

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

**ESCUELA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
Y AUTOMÁTICA**



HABILIDAD DE AUTO CARGA EN UN ROBOT PERSONAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

AUTOR: SERGIO SÁNCHEZ CARBALLIDO

TUTORES: MARÍA MALFAZ
ÁLVARO CASTRO

2009

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar esta oportunidad para dar las gracias a todas aquellas personas que han sido influyentes en toda mi etapa universitaria. Para mí esta etapa no solo implica el desarrollo intelectual académico, sino también, el crecimiento personal. Es en este desarrollo personal donde en mayor medida entran todas las personas que han sido importantes para mí.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres por todo el cariño y el esfuerzo que han empleado en que no solo este periodo, sino toda mi vida fuera plena. Dándome los mejores consejos y la máxima libertad para crecer por mí mismo, pero con la certeza de que ellos siempre estarán ahí cuando los necesitare.

A mi hermano Alberto, al cual quiero mucho aunque a veces sea difícil aguantarme y no lo demuestre demasiado.

A Mercedes que era amiga ya en el instituto, mucho antes de ser compañeros de clase. Gracias por siempre estar dispuesta a ayudarme, escucharme o regañarme.

Javi gracias por haberme ayudado siempre sin esperar nada a cambio.

María, Ángela no por haberos conocido más tarde sois menos importantes, sino todo lo contrario. Desde que os conocí la universidad fue mucho más interesante y divertida.

A todos mis amigos de fuera de la universidad con los que he crecido desde pequeño y con los que he compartido risas, dudas, llantos, inquietudes y sobre todo buenos momentos. No os nombro porque vosotros sabéis quienes sois.

Además, agradecer a Keith Moon y John Entwistle ser como fueron.

También me gustaría dar las gracias a mis tutores del proyecto María y Álvaro por toda su ayuda y consejos. Agradecer a Arnaud Ramey que me prestara sus brillantes ideas sin apenas conocerme. Gracias a Ana Corrales creadora de la habilidad de movimientos relativos. Javier Gorostiza gracias por animar las tardes con buenas charlas y música.

Gracias a todos.

Índice del documento

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	Motivación del proyecto	7
1.2	Objetivos del Proyecto	8
1.3	Estructura del documento	8
2	ESTADO DEL ARTE	10
2.1	Introducción	10
2.2	Auto-carga en robots	10
2.3	Dispositivos sensoriales para el análisis de escenarios	15
2.3.1	Láser	15
2.3.2	Visión artificial	16
3.	DESARROLLO DE LA HABILIDAD DE AUTO-CARGA PARA EL ROBOT PERSONAL MAGGIE	19
3.1	Introducción. Robot Maggie	19
3.2	Exposición del problema	22
3.3	Descripción de los sensores utilizados	23
3.4	Descripción de la estación de carga	25
3.5	Diseño de la solución	26
3.5.1	Inicio de la habilidad de carga	29
3.5.2	Segmentación del entorno con visión por computador para encontrar una posible baliza	29
3.5.3	Confirmación de baliza y acercamiento	38
3.5.3.1	Etapa de acercamiento	42
3.5.4	Detección y acople a la estación mediante cálculos con el láser	42
4	RESULTADOS OBTENIDOS Y LIMITACIONES DEL SISTEMA	57
4.1	Resultados experimentales	57
4.2	Limitaciones del sistema	61
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	64
5.1	Conclusiones del proyecto	64
5.2	Trabajos futuros	65
6	REFERENCIAS	67

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 : Robot aspirador Roomba evitando una pared (img. Izq.).....</i>	<i>11</i>
<i>y encontrando la estación de carga (img. Der.)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.2: Aibo.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.3: Terminal de carga de Aibo</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.4: Aibo cargandose.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.5: Asimo</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.6: Como utiliza sus sensores Nomad XR4000</i>	<i>14</i>
<i>para encontrar la estación de carga.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.1: Robot Maggie</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.2: Capas de la arquitectura A/D.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.3: Esquema de sensores.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.4: Estación de carga (izquierda). Acople (derecha).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.5: Detalle acoplamiento.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.6: Esquema de la solución.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.7: Ejemplo de captura con la cámara web en RGB.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.8: Representación del espacio de colores RGB.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.9: Representación del espacio de colores HSV.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.10: Imagen en el espacio de colores HSV y sus bandas separadas de izquierda a derecha respectivamente H, S, V</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.11: Resultado de la umbralización del amarillo para el canal S</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.12: Resultado de la umbralización del canal H.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.13: Resultado de la umbralización del</i>	<i>35</i>
<i>amarillo de la baliza</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.14: Resultado de la umbralización del</i>	<i>35</i>
<i>naranja de la baliza</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.15: Resultado de la umbralización del</i>	<i>35</i>
<i>rosa de la baliza.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.16: Resultado de la suma de la umbralización.....</i>	<i>36</i>
<i>de cada una de las tres franjas de la baliza.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.17: Resultado de aplicar el algoritmo de Canny a.....</i>	<i>37</i>
<i>una de las franjas de la baliza ya umbralizada</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.18: Ejemplo de una detección con ruido adyacente</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.19: Una de las mascaras que están en la base de datos.....</i>	<i>39</i>
<i>a la espera de ser introducidas.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.20: Forma asignada a la estación</i>	<i>43</i>
<i>por los algoritmos del láser</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.21: Análisis del coherencia de las esquinas A y B con el ancho de la estación.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.22: Datos necesarios para el acople</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.23: Datos obtenidos del algoritmo del láser.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.24: Muestra del cálculo</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.25: Datos conocidos y buscados.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.26: Vista del punto en el proceso de calculo</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.27: Cambios de los resultados en función de la posición de Maggie respecto a la estación</i>	<i>52</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 3.28: Ejemplo del cambio de ejes realizado. x_0, y_0 ejes donde se iniciaciliza Maggie; x_f, y_f ejes actuales de Maggie</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.1: División en zonas de la habitación para la toma de muestras.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.2: Gran incidencia de luz sobre la baliza.....</i>	<i>62</i>

Capítulo 1:

INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del proyecto

El presente proyecto trata de abordar una de las cuestiones que actualmente más preocupan en el campo de la robótica, la autonomía energética de los robots. Se intentará resolver dicha cuestión mediante el diseño e implementación de un sistema de carga automática de las baterías de un robot personal.

Cada vez se quiere conseguir robots más independientes de las personas a la hora de realizar las tareas para las que están diseñados, es decir, que estos robots sean más conscientes del entorno en el que se mueven, más sociables, amigables y fáciles de manejar por un usuario no experto en robótica. Además, esta independencia conlleva que los robots puedan realizar las tareas para las que han sido diseñados sin la continua supervisión de una persona.

Una condición fundamental para la independencia de un robot es que posea una autonomía energética, es decir, el robot debe ser capaz de mantenerse operativo indefinidamente haciendo uso de sus recursos. Para que un robot este operativo el nivel de carga de sus baterías debe mantenerse dentro de un umbral. Este umbral preestablecido es el que define el rango óptimo de operación del robot, por lo tanto, es necesario que el robot sea capaz de detectar e identificar el estado de su carga y compararlo con los límites establecidos. De la comparación del nivel de batería se obtiene la decisión del robot de si es necesario o no acudir a la estación de carga. Una vez cargado, el robot continuará con sus tareas permitiendo al usuario “olvidarse” de él, consiguiéndose de esta manera una eficiencia mucho mayor.

El auge de los robots personales es un hecho que se está viendo día a día. La autonomía de un robot personal está principalmente limitada por la capacidad de la fuente de energía que lleva a bordo y para que dichos robots alcancen una expansión masiva en todos los ámbitos, es necesario e imprescindible dotarles de una gran autonomía. Entendiendo por autonomía la capacidad propia para mantenerse operativos y ser capaces de tomar sus propias decisiones.

Actualmente, la autonomía de los robots se ve limitada principalmente por el alcance energético de las baterías que llevan instaladas. A pesar del desarrollo de nuevas formas de energía más optimas y de la creación de baterías de mayor rendimiento, siempre está presente el problema del fin de esa energía. Los robots son equipados con sensores que les dotan de capacidades para detectar su estado interno, incluyendo el estado de sus baterías, con lo que podrían decidir buscar una fuente de energía cuando lo necesiten [1].

En relación con todo lo anterior, los pasos necesarios que debería seguir un proceso de auto-carga en un robot serian: En primer lugar, detectar el momento en el que el nivel de las baterías del robot es inferior a cierto umbral, para en ese instante iniciar la búsqueda del

lugar indicado para la recarga de baterías. Una vez encontrada la zona de carga el proceso debería conducir al robot hasta el lugar de carga para que se conecte y se cargue.

1.2 Objetivos del Proyecto

El objetivo final de este proyecto es el de dotar de autonomía energética a un robot personal y que esta autonomía permita al robot ser más independiente del usuario. Este objetivo se desarrollará en vistas a mejorar otro más global y ambicioso como es la construcción de un robot social y autónomo en todos los sentidos.

Dicho esto, se han marcado objetivos más concretos que a través de su alcance posibiliten los objetivos globales ya mencionados. El propósito general para la secuencia de acciones que debe realizar el proceso será que en el momento en el que el robot detecte el nivel de sus batería bajo, por debajo de un umbral determinado, este considere que es necesario la carga de sus baterías debido al inminente fin de la energía almacenada. El robot deberá ser capaz por sí mismo mediante el uso de sus capacidades, de encontrar la estación de carga, ir hasta ella y enchufarse, sin que ello acarree daños ni para la estación, ni para el propio robot.

La culminación de este proceso general será la consecuencia directa del logro de otros objetivos más específicos que se enumeran a continuación:

- Desarrollo de la fase de detección de batería baja.
- Desarrollo de la fase de detección de la baliza de señalización mediante visión, la cual, indica la situación de la estación de carga.
- Desarrollo de una primera fase de acercamiento a la estación.
- Desarrollo de la fase de detección de la estación de carga a través de un análisis de alta precisión con barrido láser.
- Desarrollo de la segunda fase de acercamiento a la estación de carga que finalizará con el acoplamiento entre el robot y la estación.

1.3 Estructura del documento

El presente documento descriptivo del proyecto se ha estructurado en cinco partes principales. En el capítulo 2 del documento se comenzará exponiendo el estado del arte en las materias relacionadas con los objetivos del proyecto. En el capítulo 3 se describirá la plataforma en la que se implementará la solución. Esta descripción sirve de introducción para comenzar la explicación del procedimiento seguido para la consecución de los objetivos. Más adelante, en el capítulo 4 se presentarán los resultados obtenidos con la ejecución del proceso y las limitaciones del mismo, a la vez que se mostrará el resultado empírico de algunas soluciones adoptadas. Para terminar, en el capítulo 5 se expondrán las conclusiones y posibles líneas de investigación futuras.

Capítulo 2:

ESTADO DEL ARTE

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este apartado se describe el ámbito de trabajo en el que se sitúa el proyecto, así se tratará de ubicar al lector en el estado del arte de la carga autónoma de robots. A continuación se mostrarán algunos modelos existentes en el mercado que de alguna manera en el momento de detectar la necesidad de recargar sus baterías, encuentran y se desplazan hasta su dispositivo de carga. Teniendo en cuenta que la auto-carga en sí es un proceso que engloba a otros más concretos, este capítulo no se quedará en la descripción de robots que realizan procesos similares al tratado en este proyecto, sino que intentará mostrar una vista panorámica de procedimientos de gran importancia dentro de la habilidad tratada en este proyecto. Estos procedimientos son: la visión por computador, el análisis de entornos con barrido laser y de forma más general, los distintos dispositivos sensoriales utilizados para la detección.

2.2 Auto-carga en robots

La libertad que un robot adquiere en todos los ámbitos cuando posee autonomía energética, está haciendo que cada vez sean más la variedad de dispositivos que han sido dotados con esta propiedad. A continuación, se enumeraran algunos ejemplos de robots con la capacidad de cargarse autónomamente:

- **Roomba** [2] es el nombre de un modelo de robot aspirador. Gracias a su sensor de seguimiento de paredes, Roomba se desplaza a lo largo de las paredes y alrededor de los muebles para limpiar toda la superficie del suelo. Para realizar este recorrido que se realiza de forma aleatoria pero a su vez inteligente, posee unos sensores láser que pueden detectar cuando Roomba se acerca a una pared u obstáculo y reducen automáticamente la velocidad para un menor ruido y suaves impactos, ver Figura 2.1 (izquierda). Para conocer cuándo está chocando con algún objeto de la habitación o con la pared, Roomba utiliza sensores de contacto. Una vez que Roomba ha terminado de limpiar o cuando el nivel de batería es bajo, el sistema de seguimiento de paredes guía a Roomba hasta que detecte la emisión de un haz láser que emite la base de carga, ver Figura 2.1 (derecha). Uno de los requerimientos para encontrar la base de carga es que ésta se sitúe cercana a la pared. Teniéndose en cuenta este requerimiento y a través de la utilización de su capacidad de seguimiento de paredes se tiene la certeza de que en algún momento Roomba detectará la señal de la base de carga que, una vez encontrada, guiara al robot para un acople correcto.



*Figura 2.1 : Robot aspirador Roomba evitando una pared (img. Izq.)
y encontrando la estación de carga (img. Der.)*

- **Aibo** [3] es un perro robot fabricado por Sony, ver Figura 2.2. Aibo está dotado con la capacidad de conocer continuamente la carga disponible en sus baterías, cuando su nivel es bajo o cuando el usuario se lo indica mediante un comando de voz, el robot comienza la búsqueda de su terminal de carga, ver Figura 2.3.

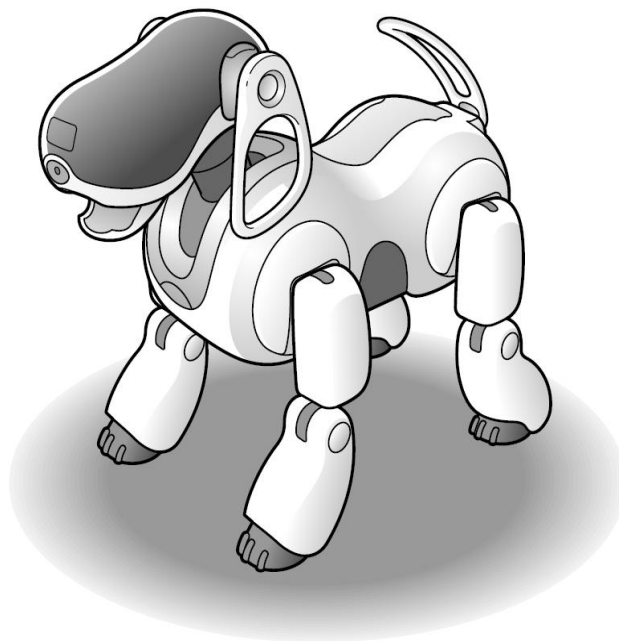


Figura 2.2: Aibo

El terminal de carga de Aibo está formado por un indicador del terminal (baliza en la parte trasera) que Aibo localizará mediante visión, utilizando este indicador para acercarse a la zona en la que se sitúa el terminal de carga. Una vez está en las proximidades del terminal, Aibo girará por sus alrededores hasta detectar el segundo indicador de la terminal de carga (en el suelo, parte delantera), lo que le servirá para saber su posición respecto al terminal. Cuando Aibo conoce la situación del terminal y su posición respecto a él, se colocará de espaldas al terminal y andará hacia atrás hasta que las guías (salientes en la parte trasera) entren en contacto con las patas del perro, siendo ese momento el idóneo para que Aibo se siente y se conecte mediante las conexiones de carga situadas en la parte inferior de su estomago, ver Figura 2.4.

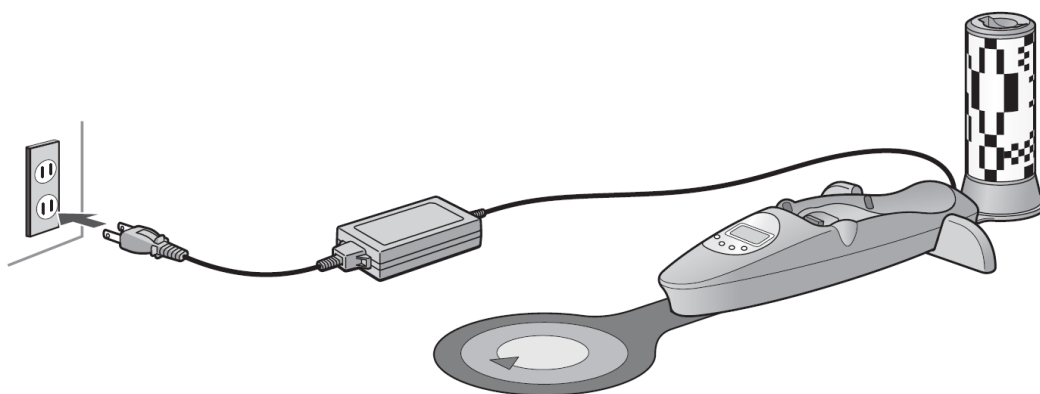


Figura 2.3: Terminal de carga de Aibo

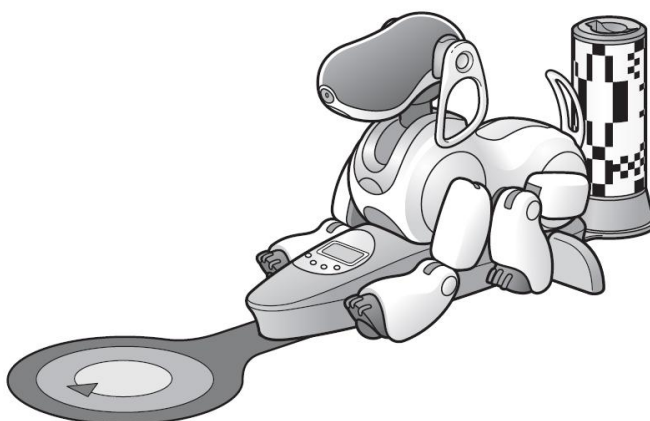


Figura 2.4: Aibo cargandose

- **Asimo** [4] es un robot humanoide creado por Honda Motor Co. para la interacción con humanos y que posee la capacidad de cargarse por si solo cuando lo necesite. Asimo ha sido diseñado y construido lo más parecido posible a una persona, ver Figura 2.5. La propiedad más característica que posee es la de andar sobre sus dos piernas emulando la forma de andar de los humanos, puede realizar otros procesos tan variados como son el reconocimiento de caras o la dirección de una orquesta sinfónica. Para poder caminar de forma autónoma Asimo está equipado con varios sensores que le permiten reconocer su entorno con el fin de evitar obstáculos y detectar objetos de su interés. Los sensores que tiene son: dos en su parte delantera que analiza el suelo mediante un barrido laser y un sensor infrarrojo, otros dos sensores de ultrasonidos con un barrido de 180° situados uno en su parte delantera y otro en la trasera, por ultimo posee un sensor de visión. Estos sensores le permitirán realizar sin problemas el proceso de carga autónoma, para ello cuando el nivel restante de la batería caiga debajo de cierto nivel, Asimo identificará y caminará a la estación de carga disponible más cercana y se recargará automáticamente.



Figura 2.5: Asimo

- **Nomad XR4000** [5] es un robot móvil desarrollado en la Australian National University para ser manejado remotamente desde internet, para ello, debía ser energéticamente autónomo. Para conseguir esta autonomía se desarrollo para él un sistema de auto-carga que conlleva la detección de su estación de energía. Dicha estación posee una baliza que emite una señal infrarroja para ser detectada. Nomad también tiene varios sensores que le permiten la detección de la estación de carga, entre ellos está otro emisor infrarrojo que localiza objetos a 5 metros de distancia mediante la reflexión de la señal infrarroja. El sensor infrarrojo por sí solo no puede detectar la estación de carga, por lo que necesitará más sensores. La detección infrarroja es complementada usando un barrido láser y un sonar. La distinción entre los objetos cercanos y la estación lo hace el barrido láser, que detectará detalles específicos de la estación de carga, ver Figura 2.6.

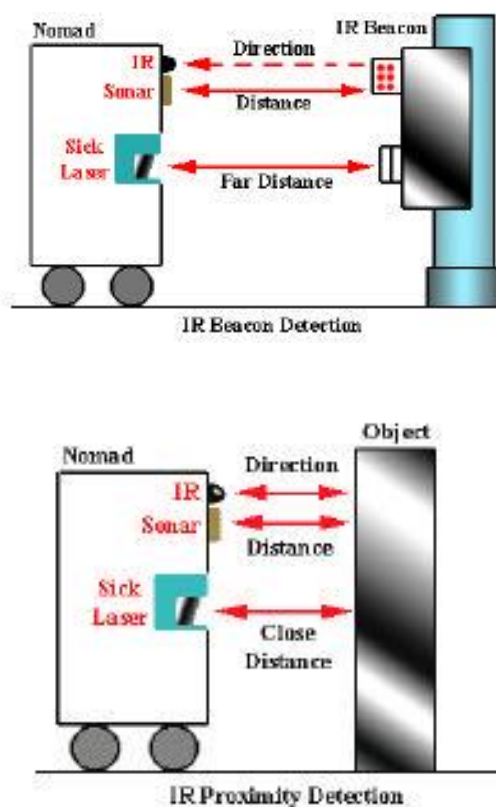


Figura 2.6: Como utiliza sus sensores Nomad XR4000 para encontrar la estación de carga

2.3 Dispositivos sensoriales para el análisis de escenarios

La detección de objetos es clave en robots móviles, ya que posibilitará que los movimientos del robot se realicen de forma segura y coherente. Con esto se quiere decir que se conseguirá evitar obstáculos y elegir las mejores opciones, lográndose finalmente llegar a los destinos propuestos. Existe un gran número de estudios dedicados al problema de detección de objetos para plataformas de robots móviles y vehículos inteligentes, ya que cualquier robot que deba operar con seguridad en un medio desconocido o dinámico, debe implementar este sistema de percepción [6]. La realización de un agente de detección de objetos se suele realizar mediante la fusión de datos obtenidos de varios sistemas sensoriales heterogéneos, a continuación se mostrarán algunos de los sistemas usados con este propósito junto con ejemplos de implementación de los mismos.

2.3.1 Láser

Los sensores laser se utilizan en detección de obstáculos desde hace muchos años, debido a que son los que dan mayor seguridad y proporcionan resultados más precisos. En 1916, Albert Einstein estableció los fundamentos para el desarrollo de los láser y de sus predecesores, utilizando la ley de radiación de Max Planck basada en los conceptos de emisión espontánea e inducida de radiación. Townes y Arthur Leonard Schawlow son considerados los inventores del láser, el cual patentaron en 1960. En 1969 se encuentra la primera aplicación industrial del láser al ser utilizado en las soldaduras de los elementos de chapa en la fabricación de vehículos. Cuando se inventó en 1960, se denominaron como "una solución buscando un problema a resolver", desde entonces se han vuelto omnipresentes, se pueden encontrar en miles de variadas aplicaciones en cualquier sector de la sociedad actual. Estas incluyen campos tan dispares como la electrónica de consumo, las tecnologías de la información (informática), análisis en ciencia, métodos de diagnóstico en medicina, así como el mecanizado, soldadura o sistemas de corte en sectores industriales y militares [7] [8], además de en el campo que nos compete en el presente proyecto que es el de la detección.

En el campo de la detección ha adquirido gran importancia el telemetro láser. Este dispositivo utiliza la medición del tiempo de vuelo de un haz de luz láser emitido y que se refleja en los objetos, permitiendo conocer con gran precisión la distancia a la que este objeto se encuentra. El telemetro láser es muy utilizado en robótica, siendo utilizado en robots para la definición de objetos en 2-D o 3-D, como se ha podido ver en el apartado anterior con el Nomad XR4000 o como se verá más adelante en el presente proyecto, apartados 3.3 y 3.5.4. Sin embargo, la robótica no es su única utilidad, también se puede ver utilizando un telemetro láser a un francotirador o a un arquero que quiere conocer la distancia a su objetivo o en golf para conocer la distancia de un golpe.

2.3.2 Visión artificial

El propósito de la visión artificial es programar un computador para que "entienda" una escena o las características de una imagen. Los objetivos típicos de la visión artificial incluyen tareas tales como, la detección, segmentación (ej.: separación por colores), localización, reconocimiento de ciertos objetos en imágenes (ej.: caras humanas), seguimiento de un objeto en una secuencia de imágenes (ej.: tracking) o mapeo de una escena para generar un modelo tridimensional que podría ser usado por un robot para navegar por la escena. Estos objetivos se consiguen por medio de reconocimiento de patrones, aprendizaje estadístico, geometría de proyección, procesamiento de imágenes, teoría de gráficos y otros campos [9].

Como ejemplo real de visión artificial, ER Vision object recognition system es un sistema de reconocimiento de objetos, el cual, puede ser usado por un robot para interactuar con su ambiente. Es un sistema versátil y trabaja robustamente con cámaras de bajo precio. El sistema de reconocimiento de objetos está especializado en el reconocimiento de objetos planos y con textura. No obstante, podrá reconocer objetos tridimensionales tomándolos como objetos compuestos de estructuras planas y con textura, o también objetos compuestos por componentes ligeramente curvados. El sistema captura una o más imágenes de un objeto desde varios puntos de vista. El algoritmo de reconocimiento de objetos extrae cientos de detalles únicos de cada objeto, de los que un pequeño subconjunto de esos detalles y su interrelación serán los que identifiquen el objeto. Los resultados del sistema serán el nombre del objeto y sus dimensiones a escala respecto a la posición de la cámara.

Una muestra de integración de varios sistemas, hecho tan habitual en visión artificial, es vSLAM, Visual Simultaneous Localization and Mapping, que es un sistema que aúna localización y mapeado. Utiliza la tecnología ER Vision explicada en el párrafo anterior para reconocer objetos, a partir de este sistema se podrá reconocer objetos que ya estaban en el entorno y definir objetos nuevos que no estaban con anterioridad. vSLAM fusionará este sistema de reconocimiento de objetos con la odometría del robot y una base de datos para crear un mapa del lugar en el que se encuentra [10].

Para el diseñar el sistema de análisis por visión de este proyecto se utilizó OpenCV que es una biblioteca libre de visión artificial originalmente desarrollada por Intel. Desde que apareció su primera versión alfa en el mes de enero de 1999, se ha utilizado en infinidad de aplicaciones. Desde sistemas de seguridad con detección de movimiento, hasta aplicativos de control de procesos donde se requiere reconocimiento de objetos. Esto se debe a que su publicación se da bajo licencia BSD, que permite que sea usada libremente para propósitos comerciales y de investigación con las condiciones en ella expresadas.

Open CV es multiplataforma, Existiendo versiones para Linux, Mac OS X y Windows. Contiene más de 500 funciones que abarcan una gran gama de áreas en el proceso de Visión, como reconocimiento de objetos (reconocimiento facial), calibración de cámaras, visión estéreo y visión robótica.

OpenCV ha sido usada en el sistema de visión del vehículo no tripulado Stanley de la Universidad de Stanford, el ganador en el año 2005 del Gran desafío DARPA. OpenCV se usa en sistemas de vigilancia de vídeo y es la clave en el programa Swistrack, una herramienta de seguimiento distribuida [25].

Capítulo 3:
DESARROLLO DE LA
HABILIDAD DE AUTO-
CARGA PARA EL ROBOT
PERSONAL MAGGIE

3. DESARROLLO DE LA HABILIDAD DE AUTO-CARGA PARA EL ROBOT PERSONAL MAGGIE

3.1 Introducción. Robot Maggie

El robot Maggie [10], ver Figura 3.1, es un robot personal desarrollado a nivel software y hardware [15] por el grupo de investigación RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid. Su principal misión es servir de soporte a la investigación de la interacción Humano-Robot [1].



Figura 3.1: Robot Maggie

El desarrollo de Maggie está totalmente enfocado a conseguir la mejor interacción social con los humanos. Por este hecho, el aspecto de Maggie también está orientado a mejorar esta interacción. Es decir, se quiso que Maggie tuviera un diseño lo más amigable

posible. Al mismo tiempo también se buscó que todas las nuevas mejoras, que seguro llegarían, fueran lo más fácil posible de introducir.

Para conseguir que Maggie fuera atractiva y al verla no provocara una sensación de rechazo, su carcasa exterior se diseñó emulando el aspecto de una muñeca. Maggie tiene simetría facial, grandes y muy espaciados ojos, además de un marcado contraste de color [10].

El intercambio de emociones de forma no verbal tiene una gran importancia en las relaciones entre humanos. Pequeños movimientos de la cabeza, la boca, los ojos o las cejas, son a menudo suficiente para indicar el estado del progreso de una interacción, por ejemplo falta de interés, diversión, entendimiento. Maggie posee tanto expresiones faciales como movimientos en su cuerpo, brazos y párpados para mejorar la interacción con humanos [10].

Continuando con el objetivo de conseguir la mejor relación con los humanos. Maggie posee la habilidad de comunicarse a través de diferentes mecanismos, como el tacto, las expresiones de cara y cuerpo, además de la comunicación verbal.

Para que Maggie pueda llevar a cabo todas las tareas que se le pedirían a un robot social, es un requisito fundamental el que sea capaz de moverse. Por ello Maggie ha sido provista de una base móvil comercial que le permite poseer esta habilidad. La base de Maggie es una Magellan Pro mobile robot producida por iRobot [10]. Esta base está motorizada por dos ruedas accionadas diferencialmente y posee una ruedecita estabilizadora a cada lado. La base también está compuesta por 12 paragolpes, 12 sensores ópticos infrarrojos y 12 sensores de ultrasonidos. Encima de la base se ha colocado el localizador láser Sick LMS 200 (ver sección 3.3).

En la zona superior del robot, es donde éste incorporan todos los sistemas de interacción. La cabeza tiene dos grados de libertad, permitiendo dos movimientos básicos, izquierda/derecha y arriba/abajo [10]. La cabeza está equipada con dos ojos negros, dos párpados móviles controlables y boca. La boca tiene leds que se encenderán con el habla y detrás de ella posee una web cam con la que se solventa la habilidad de visión (ver sección 3.3).

Posee dos brazos con un grado de libertad, que se moverán durante la comunicación. Cumpliéndose así el propósito de la interacción no verbal para el que han sido creados.

En el pecho tiene un ordenador portátil utilizado para posibilitar una comunicación visual con los usuarios a través de imágenes mostradas en él. A este ordenador hay conectado un micrófono inalámbrico y dos altavoces, con los que se realiza la habilidad del habla.

En su parte superior Maggie incorpora varios sensores capacitivos que emularán el sentido del tacto. Tiene un sensor en cada hombro, otro en la parte superior de la cabeza, dos en el pecho, dos en el abdomen, dos en la parte de arriba de la espalda y otros tres en cada brazo [10].

Maggie cuenta con un ordenador para el control del movimiento, visión, voz, pantalla táctil, sensores, telémetro láser, ultrasonidos, infrarrojos, sensores de tacto y actuadores de la cabeza, brazos y ojos. El ordenador está interconectado con el mundo

exterior a través de una red WiFi. Desde el punto de vista de software, se han diseñado componentes que permiten la construcción de un sistema de control que sea capaz de soportar los proyectos de investigación para la cual fue diseñada y construida Maggie.

La arquitectura software de Maggie es la arquitectura Automático-Deliberativa A/D. Esta arquitectura se basa en teorías de la psicología moderna, en las cuales, se dice que existen dos mecanismos mediante los que el hombre procesa la información percibida de su entorno: los procesos automáticos y los controlados (deliberativos). En el ser humano cabe por lo tanto diferenciar entre dos niveles de actividad mental: Nivel deliberativo y el Nivel Automático. Basándose en estas ideas, en esta arquitectura se establecen sólo dos niveles, ver Figura 3.2. El Nivel Deliberativo está asociado con procesos reflexivos y el Nivel Automático con procesos automáticos. Estos últimos, son en la actualidad los encargados de mandar y recibir información de todo el hardware del robot.

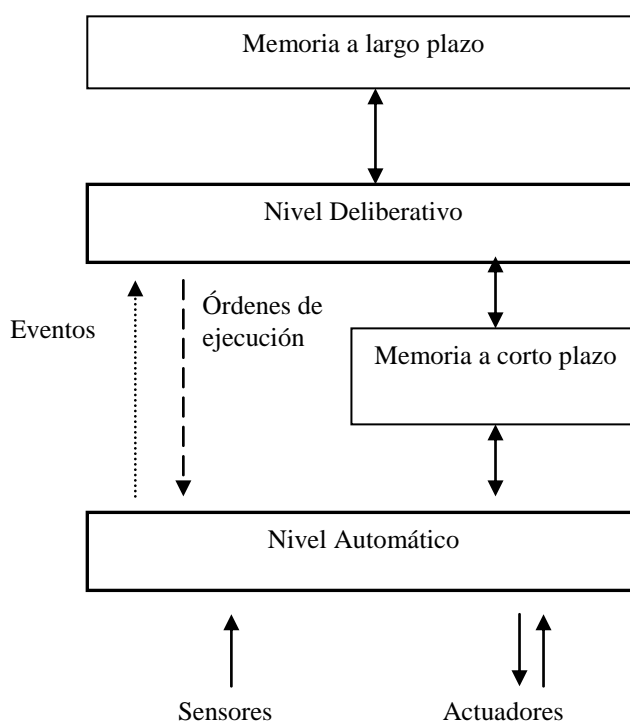


Figura 3.2: Capas de la arquitectura A/D

El objetivo de este proyecto global, que es Maggie, consiste en construir el sistema de control siguiendo el paradigma de la arquitectura A/D, propuesta por el grupo de investigación Robotics Lab de la Universidad Carlos III de Madrid. En esta propuesta el componente básico de construcción son las llamadas habilidades. Las habilidades son las diferentes capacidades para razonar o llevar a cabo una acción. Estas habilidades son activadas por órdenes de ejecución producidas por otras habilidades o por un secuenciador, devolviendo datos y eventos a las habilidades o secuenciadores que las hayan activado o a habilidades que estén interesadas en la información suministrada. Las habilidades son la base de la arquitectura AD [1]. La Figura 3.2 muestra un diagrama con la representación de la arquitectura AD.

En términos de ingeniería, una habilidad es un objeto que encapsula los datos y procesos que describen el comportamiento global de la tarea o acción que debe realizar el robot. El diseño basado en objetos facilita el desarrollo del software debido a que permite la reutilización de componentes, herencia y el polimorfismo [10]. La clase habilidad tiene un método denominado proceso que define el lazo de control de la habilidad. Este método es redefinido en cada subclase habilidad. También incluye un método que la activa o desactiva desde un objeto o aplicación externa. Todas las operaciones multiproceso son ocultas para el usuario [10].

Según [10], una instancia de un objeto habilidad se caracteriza por:

- Tener 3 estados: Lista, en ejecución y bloqueada.
- Tener 3 modos de funcionamiento: Continuo, periódico y por eventos.
- Cada habilidad es un proceso, la comunicación entre procesos se hace por medio de eventos o por la memoria compartida.
- Una habilidad representa una o más tareas o la combinación de diferentes habilidades.
- Una habilidad debe suscribirse a un evento y definir su comportamiento en el momento que el evento ocurre.

El proceso de la habilidad que se desarrolla en este proyecto describe todas las acciones necesarias para realizar la auto-carga del robot Maggie. Esta habilidad está suscrita a un evento para ser activada. Todo el desarrollo utilizará una habilidad principal que se apoyará en otras habilidades diferentes para realizar algunos de los procedimientos.

3.2 Exposición del problema

Tal y como se ha dicho en la introducción, por la definición de autonomía, el robot debe ser capaz de mantenerse operativo indefinidamente. La condición sin equanum para que este hecho se produzca, es que el nivel de carga de las baterías del robot se mantenga dentro de un umbral. Este umbral preestablecido, es el que define el rango óptimo de operación del robot, por lo tanto, es necesario que el robot sea capaz de detectar y de identificar el estado de su carga y compararlo con los límites establecidos. De la comparación del nivel de batería, obtenemos la decisión del robot de si es necesario o no acudir a la estación de carga. Si es detectada la necesidad de cargarse el robot debe tener la

capacidad, mediante la utilización de sus recursos, de analizar el entorno en el que se encuentra para llegar hasta la zona de carga. Este análisis del entorno debe permitir al robot descartar espacios y objetos sin interés, centrándose en posibles lugares donde se pueda encontrar la estación de carga y mediante comparaciones encontrar sin duda alguna dicha estación. Después de encontrar la zona de carga será necesario que sea capaz de dirigirse hasta ella con las condiciones de velocidad y posición necesarias para que se produzca un acople correcto para la carga de sus baterías.

3.3 Descripción de los sensores utilizados

Para el alcance de los objetivos propuestos el proyecto se centrará en el uso de varias herramientas que Maggie proporciona. Las principales son la visión por computador y un telemetro láser, que permitirán hacer un análisis de la estancia en la que se encuentra el robot. Estas herramientas dan la posibilidad de descartar objetos del entorno que no interesan y centrarse en otros que permitirán encontrar el lugar buscado, además de poder conseguir llegar hasta él con precisión. También se utilizará una tarjeta de adquisición de datos para detectar el nivel de las baterías y el estado del robot. Esto y otras herramientas que se describirán con detalle más adelante, van unidas a un análisis y procesamiento de datos vía software mediante el uso del lenguaje de programación C++ y el uso de la librería de análisis de imágenes OpenCv.

Una de las partes más importantes en la arquitectura A/D implementada en Maggie es la de los sensores. Los sensores proporcionarán a Maggie a través de la arquitectura A/D información sobre su entorno, permitiendo un posterior análisis de todo ello. Los sensores en Maggie son de dos tipos: Los Sensores Físicos y los Sensores Virtuales.

Se llama Sensor Físico a un aparato capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, en magnitudes eléctricas. Las magnitudes físicas a medir dependen del tipo de sensor y pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, etc. Una magnitud eléctrica obtenida puede ser una resistencia eléctrica (como en una resistencia que varía con la temperatura, RTD), una capacidad eléctrica (como un sensor de tacto), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como un fototransistor), etc.

Los Sensores Virtuales dan información de los Sensores Físicos a las Habilidades Automáticas y a las Acciones Reflejas. Estos sensores informan sobre el entorno del robot (Ej. Láser, sonar) o su estado interno (Ej. Odometría, etc.) Los Sensores Virtuales almacenan la información obtenida de los sensores físicos en un formato adecuado para ser usado por otros elementos.

Los sensores que el robot tiene que utilizar en la auto-carga, ver Figura 3.3, son para conocer el estado de sus baterías, detectar la estación de carga, identificar la distancia a la que se encuentra y por último saber cuándo se ha producido el acoplamiento. Estos sensores son:

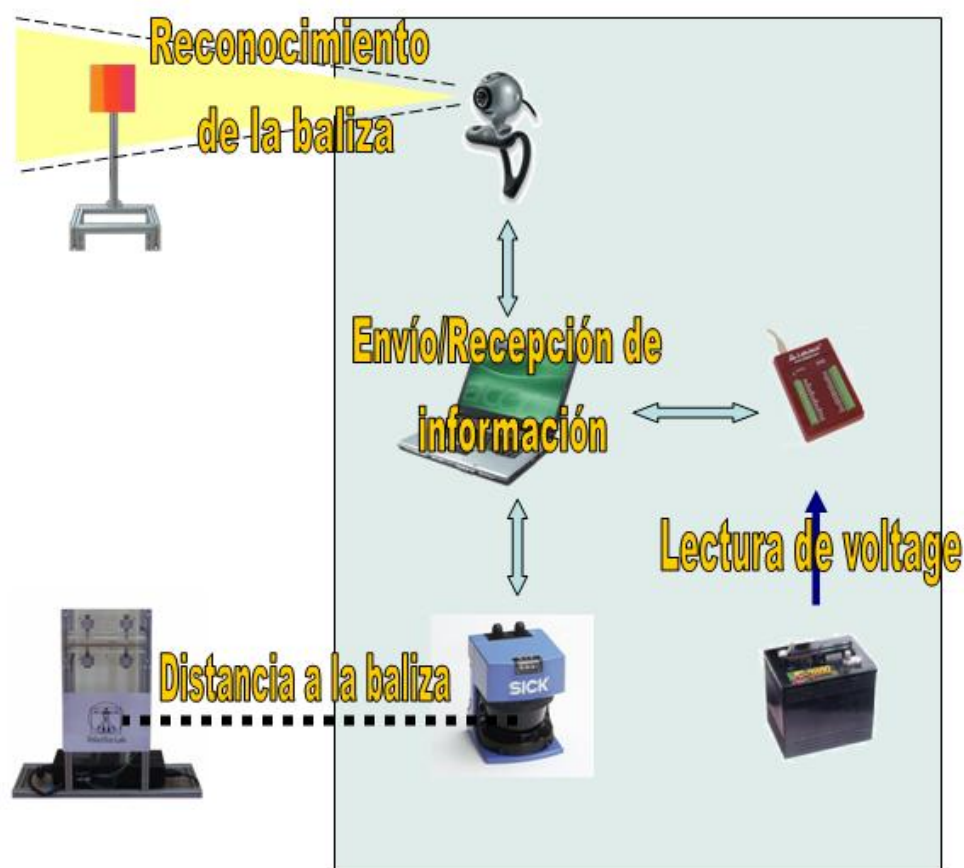


Figura 3.3: Esquema de sensores

La interrelación entre los distintos sensores es tal y como se muestra en la Figura 3.3. La lectura del voltaje de las baterías proporcionará los datos necesarios para saber cuándo se debe iniciar el análisis con los demás sensores, siendo estos otros sensores utilizados para reconocer la estación de carga mediante visión y barrido láser, estos procesos serán explicados en profundidad a lo largo del capítulo 3.

Tarjeta de adquisición de datos LABJACK: La adquisición de datos consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un sistema digital [12]. El elemento que hace dicho proceso es la tarjeta de adquisición de datos. Esta tarjeta tiene entradas y salidas tanto digitales como analógicas de las que se servirá el proceso para leer el voltaje de las baterías.

Cámara-web: Situada en la cabeza del robot, la cámara-web forma parte de un sistema multisensorial. La información procedente de la cámara es validada, comparada y finalmente integrada con el resto de la información proporcionada por otro tipo de sensores. El resultado es la reconstrucción de la escena 3-D, que permite la navegación autónoma del sistema [13] [14]. Sirve para detectar donde se encuentra la estación de carga, mediante una codificación por colores.

Telémetro láser Sick LMS 200: Funciona mediante la emisión de un haz láser a lo largo de la escena. Se encuentra en la parte frontal de Maggie a una altura de aproximadamente 25 cm del suelo. Toma mediadas con una precisión de 0,5 mm, haciendo un barrido de 180°. De este modo, en cada barrido completo proporciona 360 datos de distancia y ángulo. Midiendo el tiempo de vuelo del haz para cada ángulo, se obtiene la distancia a la que están los distintos objetos [12] en su ancho de barrido. Este sensor resultará fundamental para conocer la situación exacta de la estación de carga.

3.4 Descripción de la estación de carga

La estación de carga, ver Figura 3.4 (izquierda), consiste en una estructura metálica de aproximadamente metro y medio de altura. Esta estación es la meta del proceso y está compuesta de una zona de detección por visión. La zona de detección se trata de una baliza formada por tres colores, la cual, el robot usará como señalización para saber hacia dónde tiene que dirigirse cuando necesite cargarse y realizar un primer posicionamiento en relación a la estación. Para realizar todo este proceso de detección por visión el robot se guiará mediante el uso de la cámara web. Esta baliza de forma cuadrada tiene un tamaño de 15 cm de lado, está situada a un metro y medio del suelo y como se puede ver en la Figura 3.4 (izquierda), está compuesta por tres franjas de colores rosa, naranja y amarillo. Existe otra zona destinada a la detección, ésta es la que detectará el láser para ubicar la estación mediante su barrido, está situada a una altura de 25 cm, altura accesible para el lector láser. Esta área para la detección por barrido láser, consiste en una superficie formada por un folio que provoque el reflejo del láser.

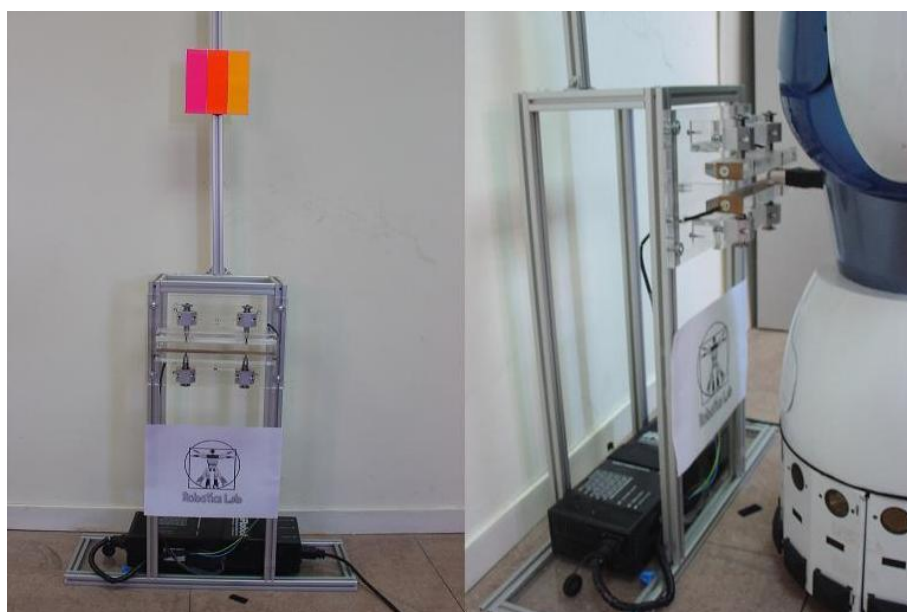


Figura 3.4: Estación de carga (izquierda). Acople (derecha)

Se puede diferenciar otra segunda parte dentro de la estructura de la estación que sería la zona de carga, ver Figura 3.4 (derecha) y Figura 3.5. Está compuesta por dos barras de metacrilato paralelas, las cuales están cubiertas por una cara por una lámina de cobre. Para facilitar el acople del robot a la estación de carga, estas dos barras de metacrilato están dotadas de muelles para absorber cualquier impacto y adecuarse a la posición en el caso de haber alguna clase de desvío en el ángulo de entrada. Además, la longitud de estas barras (25 cm), dan a la habilidad de carga, un cierto margen de error.



Figura 3.5: Detalle acoplamiento

El elemento que completa la estación de carga es el convertidor-regulador de tensión que convierte los 220 voltios de alterna en 28 voltios de continua necesarios para la recarga de las baterías.

3.5 Diseño de la solución

El diseño de la solución se ha llevado a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Inicio de la habilidad de carga.
- Segmentación del entorno con visión por computador para encontrar la baliza.
- Confirmación de la baliza y acercamiento.
- Detección y acople a la estación mediante cálculos con el láser.

Tal y como se puede ver en la Figura 3.6, el inicio de la habilidad está sujeto a un análisis continuo del estado de las baterías, para que en el momento que el nivel de éstas sea bajo la habilidad se inicie. El inicio de la habilidad implica el comienzo de la segunda parte del proceso, la búsqueda de la estación de carga mediante segmentación del entorno por visión en busca de la baliza. Una vez que la baliza es detectada sin lugar a dudas el proceso se aproxima a ella. El acercamiento se detendrá en una posición en la que el telémetro láser sea capaz de detectar las características de la estación, localizarla, y orientar al robot respecto a ella mediante cálculos alimentados de los valores del láser. Todos estos cálculos permitirán el acoplamiento del robot, el cual, estará un tiempo cargándose antes de desacoplarse del cargador y continuar con sus tareas.

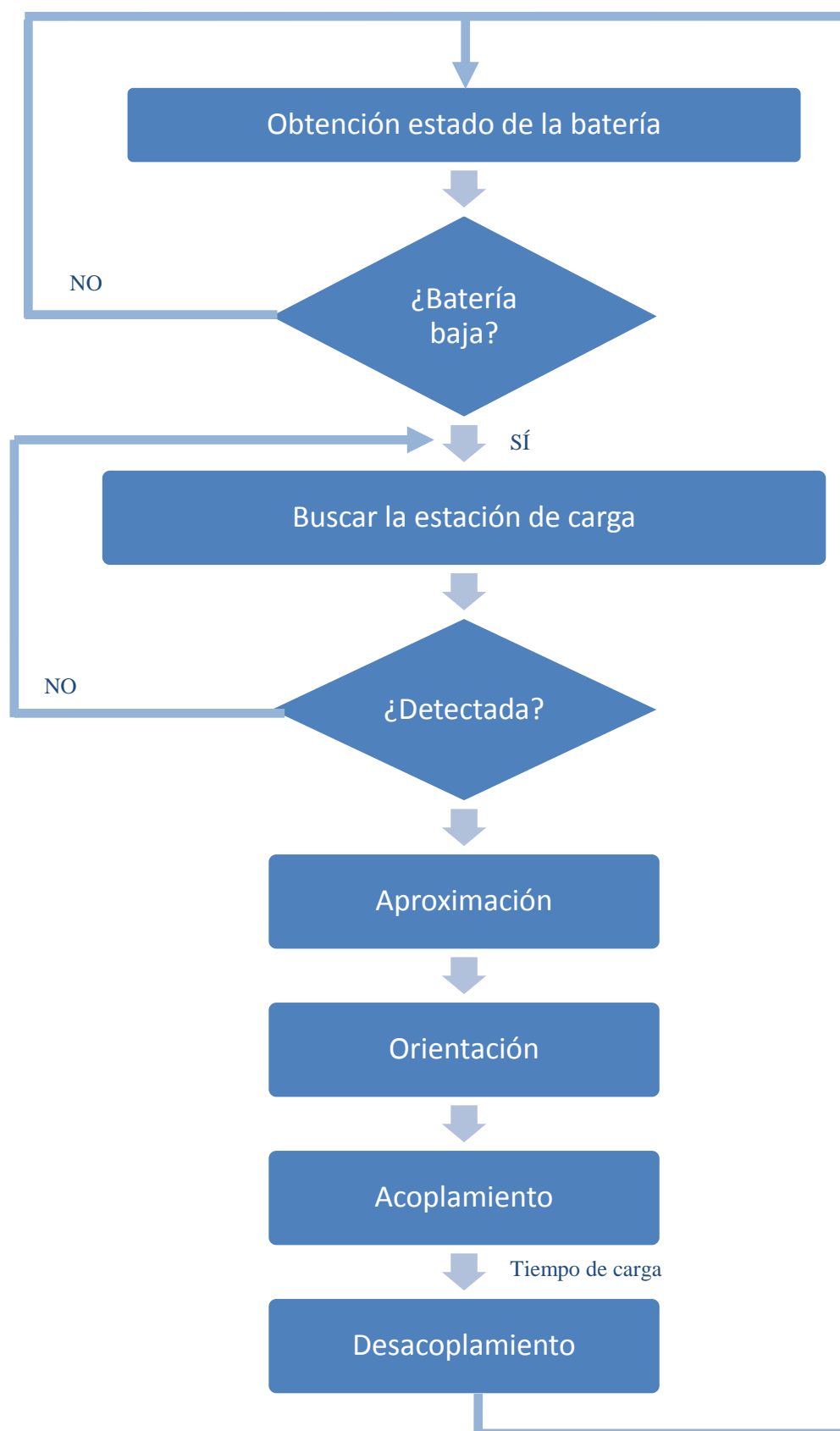


Figura 3.6: Esquema de la solución

3.5.1 Inicio de la habilidad de carga

La solución que ha sido desarrollada se ha aplicado al robot personal Maggie y ya ha sido integrada en la arquitectura AD en forma de habilidad. Esta habilidad será activada por medio de un evento que indicará que comience el proceso descrito en la Figura 3.6.

El evento que activa la habilidad será enviado al proceso cuando el nivel de las baterías de Maggie sea inferior a un nivel considerado como bajo, pero a su vez suficiente para realizar todo el procedimiento de auto-carga. Por lo tanto, el primer trabajo que realizara el proceso es el de revisar el estado de las baterías.

El proceso de revisión de la carga de baterías se debe realizar de forma continua. Esto es posible gracias a la arquitectura basada en servidores que permiten el acceso a todos los sensores/actuadores del robot, entre ellos el voltaje de las baterías [1].

Antes de desarrollar esta habilidad hay que establecer un umbral mínimo para la tensión de las baterías, a partir del cual, el robot debe ir a cargarse. La tensión de las baterías cargadas es de 28V y se ha asumido el límite inferior en 20V. Para conocer más sobre la decisión tomada a la hora de elegir este límite, ver el capítulo 4 donde se comentan los resultados obtenidos.

3.5.2 Segmentación del entorno con visión por computador para encontrar una posible baliza.

Cuando el proceso, gracias a la Arquitectura A/D, obtiene un estado de las baterías bajo se inicia el análisis del entorno de Maggie utilizando la visión por computador. Este proceso consistirá en tomar imágenes del entorno usando una cámara web. Después, se analizarán estas imágenes en busca de una señal identificativa de la posición de la estación de carga. Esta señal será la baliza de tres colores descrita en la sección 3.4.

Para el análisis de las imágenes tomadas en busca de señales identificativas de la baliza se emplean las librerías de visión OpenCv [23].

OpenCv [20] (Open Source Computer Vision Library) es una librería de tratamiento de imágenes destinada principalmente a aplicaciones de visión por computador en tiempo real. Posee una gran variedad de funciones con múltiples aplicaciones en la visión artificial, algunas de ellas y sus fines concretos para los que serán usadas se describirán a lo largo del documento.

El primer paso para el análisis por visión es obtener imágenes del entorno. Para analizar todo lo que le rodea, Maggie comienza a capturar imágenes mientras gira sobre sí misma. Para realizar el giro se le proporciona a la habilidad de movimiento de Maggie una velocidad angular fijada como una constante del proceso. Para conocer el por qué de el valor

de velocidad angular ver el capítulo 4 de resultados obtenidos. Maggie girará sin detenerse hasta que el proceso detecte la baliza.

Para la captura de las imágenes se utiliza la cámara web ya descrita. Con la cámara web se obtendrá una imagen dentro del ancho de banda visible y definida por el espacio de colores RGB con una resolución de 640x480 píxeles. La imagen capturada definirá el escenario que se encuentre en la parte delantera del robot en ese momento, ver Figura 3.7.

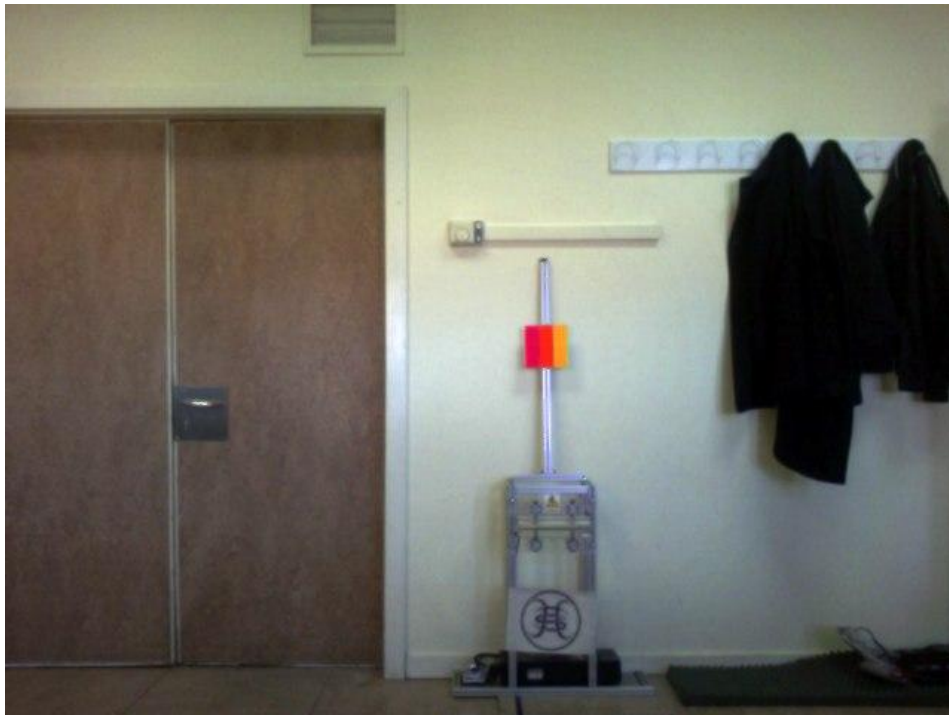


Figura 3.7: Ejemplo de captura con la cámara web en RGB

El espacio RGB se representa geométricamente como un cubo dónde un color viene definido por la mezcla de valores de intensidad de tres colores primarios: rojo, verde y azul, ver Figura 3.8. Un color viene descrito por un punto de 3 coordenadas en el cubo. El color negro se representa por $(R=0, G=0, B=0)$ y el color blanco por $(R=255, G=255, B=255)$ [18]. La gama acromática de escala de grises está representada por la diagonal del cubo.

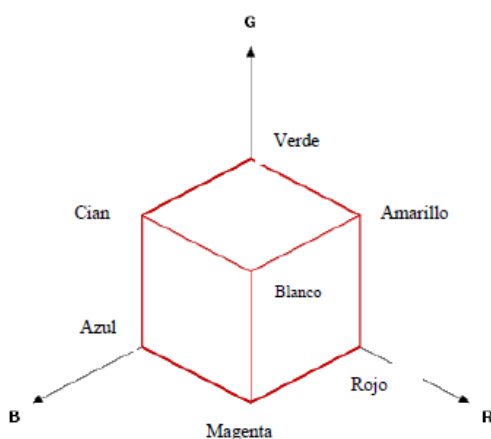


Figura 3.8: Representación del espacio de colores RGB

La cámara se sitúa en la cabeza del robot, debido a esto, si se conoce la posición de la cabeza también se conocerá la región del entorno que definirá la cámara. La cabeza ha sido colocada al iniciar la habilidad en una posición tal que el robot tenga la cabeza mirando de frente y ligeramente inclinada hacia arriba, a una altura que coincida con la altura a la que se sabe que está la baliza. La colocación de la cabeza será de vital importancia en la detección y el posterior acercamiento a la estación de carga. Esta importancia es debido a que todos los cálculos para la orientación de Maggie respecto de la baliza se hacen suponiendo que la cabeza se encuentra recta. Además una buena y completa captura de la baliza se realizará solamente si la altura a la que Maggie está “mirando”, es a la que también está la baliza.

La cabeza se mueve introduciendo valores de posiciones relativas a la posición inicial. La posición inicial será el lugar en el que tenga Maggie la cabeza al encenderse. La definición de los valores que colocan la cabeza de Maggie en la posición adecuada para detectar la baliza y realizar todos los cálculos se han hecho suponiendo que la posición inicial de la cabeza será mirando de frente y sin ninguna inclinación. Si la colocación inicial de la cabeza no fuera la supuesta se podrían producir daños en Maggie al moverse la cabeza, ya que se podría sobrepasar el fin de carrera del giro de su cuello.

En este punto, ya se ha obtenido una imagen en RGB del entorno, ahora el primer procesado de imagen consistirá en la ecualización de su histograma. El histograma de una imagen contiene la información de la probabilidad de aparición de las distintas tonalidades de color que se pueden dar en cada caso. El resultado de la ecualización expande el histograma, es decir, maximiza el contraste de la imagen sin perder información de tipo estructural. La ecualización se realiza separando la imagen en cada una de sus bandas RGB, pasando posteriormente de nuevo a su unión.

El segundo paso del procesado consiste en segmentar la imagen según los colores de las franjas de la baliza y con ello conseguir distinguirla del medio en el que se encuentra. Para lograrlo, la imagen original es transformada del espacio de colores RGB inicial, al

HSV. Esta transformación se realiza con el objetivo de conseguir que la captura se vea lo menos afectada posible por los cambios en la iluminación del entorno.

El espacio HSV representa uno de los espacios de coordenadas más clásicos e intuitivos existentes en la literatura. Su interpretación geométrica viene determinada por un cono de base cuasi-hexagonal, ver Figura 3.9. En esta representación del espacio de color, cada color trabaja con 3 componentes básicas: matiz, saturación y brillo. El matiz (H), hace referencia al valor de cromaticidad o clase de color. La saturación (S), se refiere a las longitudes de onda que se suman a la frecuencia del color, y determina la cantidad de blanco que contiene un color. Cuanto menos saturado esté un color más cantidad de blanco, y cuanto más saturado esté menor cantidad de blanco. En definitiva, la saturación representa la pureza e intensidad de un color. Así, la falta de saturación viene dada por la generatriz en la representación del cono HSV. Esa falta de saturación representa la gama de grises desde el blanco hasta el negro. La luminancia (V), se corresponde con la apreciación subjetiva de claridad y oscuridad.

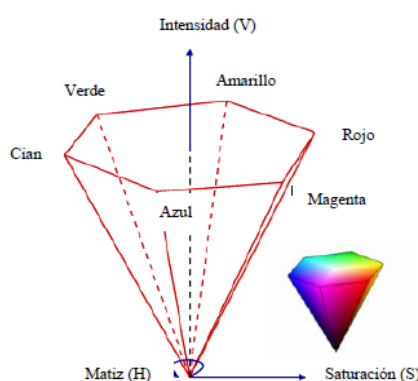


Figura 3.9: Representación del espacio de colores HSV

Por lo tanto para conseguir una mayor independencia del sistema de iluminación, ver Figura 3.10. Lo que hace el sistema es despreocuparse de la componente de luminancia (V) y se centra en el tono (H) y en la saturación (S), que van a ser las componentes por las que se va a realizar la umbralización de cada banda, inspirado en [18].

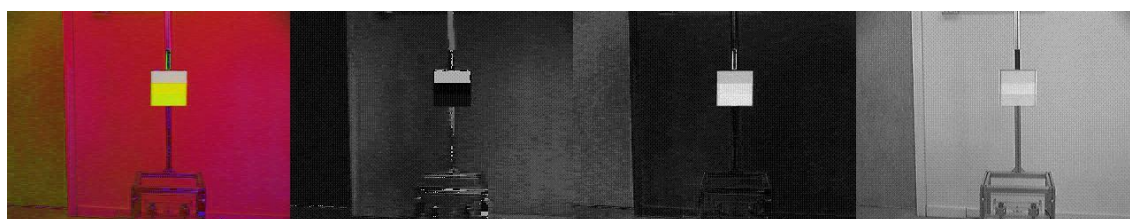


Figura 3.10: Imagen en el espacio de colores HSV y sus bandas separadas de izquierda a derecha respectivamente H, S, V

A continuación se realiza la umbralización de los colores que aparecen en la baliza. La umbralización consiste en realizar un etiquetado para cada franja de color, enumerando los posibles objetos con el color buscado.

Para encontrar cada color mediante umbralización se han introducido como contantes del proceso umbrales entre los que se comprobó empíricamente que está el color (ver el capítulo 4 de resultados obtenidos). Esto supone fijar un valor umbral superior e inferior correspondiente con cada color buscado. Estos umbrales se introducen para cada uno de los dos canales del HSV analizados (H y S). Las Figuras 3.11 y 3.12 muestran el resultado de la umbralización para los canales H y S por separado. Para obtener el lugar en el que hay color se realiza la función AND de los dos canales, este procedimiento se realizará para cada color.

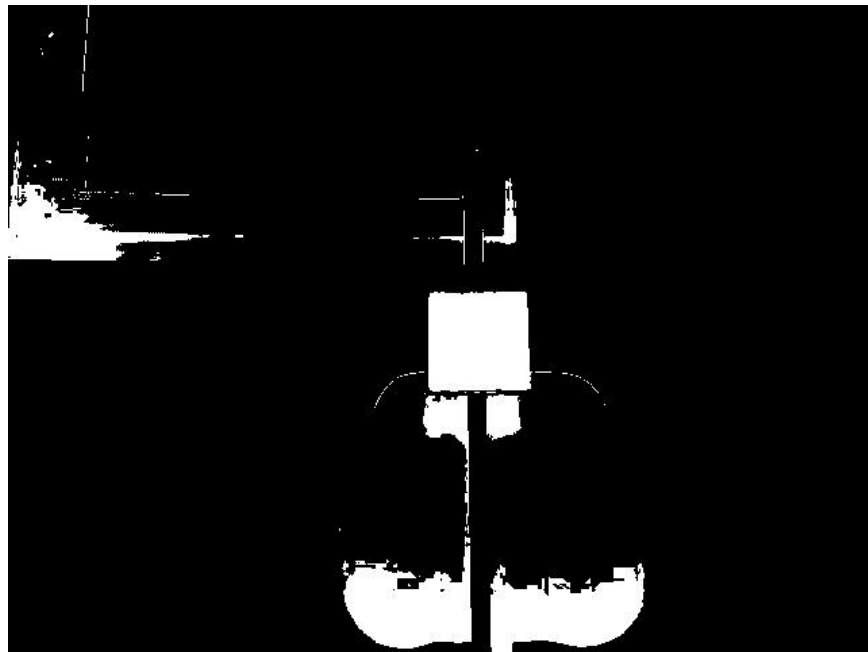


Figura 3.11: Resultado de la umbralización del amarillo para el canal S

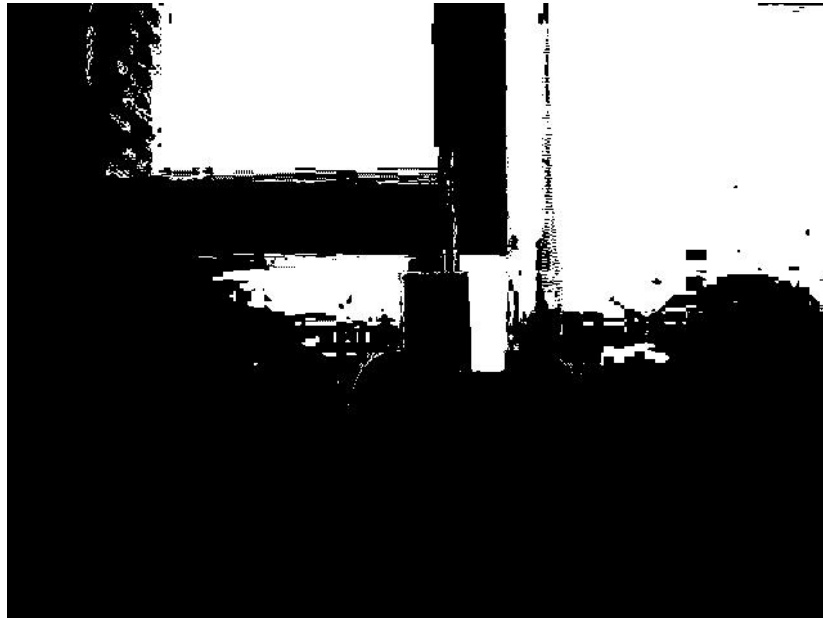


Figura 3.12: Resultado de la umbralización del canal H.

Como resultado final de la umbralización se obtienen tres imágenes binarizadas, una por cada color. En cada imagen, todo lo que estaba dentro de los umbrales del color buscado y por lo tanto podría pertenecer a nuestro objetivo es de color blanco (nivel digital 255) y el resto considerado fondo es de color negro (nivel digital 0), ver Figuras 3.13, 3.14 y 3.15. Con todo esto, y teniendo en cuenta que se tienen que detectar los tres colores, se procede a componer una imagen constituida con la suma (función OR) de las identificaciones de cada color, ver Figura 3.16.



Figura 3.13: Resultado de la umbralización del amarillo de la baliza

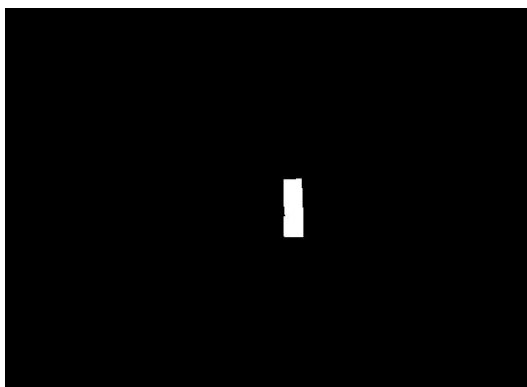


Figura 3.14: Resultado de la umbralización del naranja de la baliza

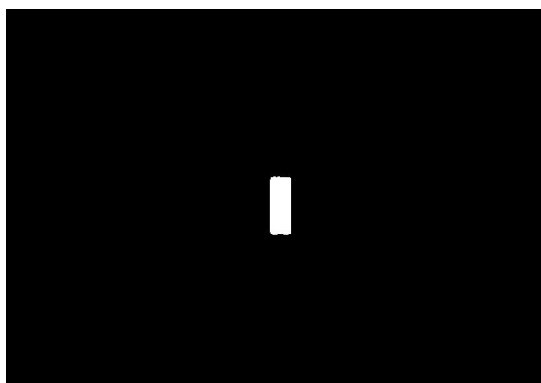


Figura 3.15: Resultado de la umbralización del rosa de la baliza

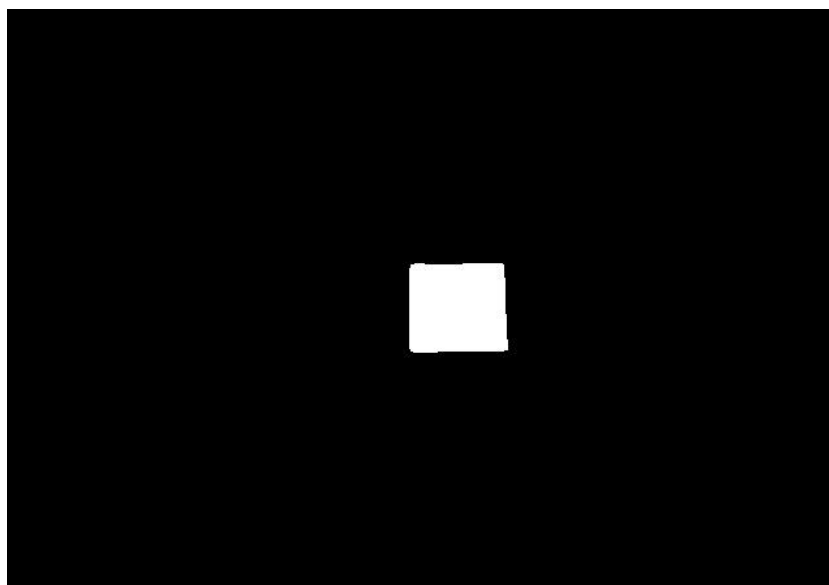


Figura 3.16: Resultado de la suma de la umbralización de cada una de las tres franjas de la baliza

Las imágenes mostradas anteriormente son de capturas sin ruido, aunque este hecho no suele ocurrir realmente. La captura, en la mayoría de los casos, está formada por la franja de color y ruido adyacente. Intentando que la detección sea lo más precisa posible se hace un primer filtrado descartándose las detecciones que no alcancen el tamaño de un pixel. Este filtrado se realiza mediante unos métodos llamados de erosión y dilatación que suprimirán el ruido aleatorio que haya quedado. Además, este procesado también sirve para rellenar posibles fallos de localización que pueden producirse en el interior del área perteneciente a lo detectado como posible baliza.

Con el propósito de eliminar falsos positivos se realizarán otros filtrados de la imagen más adelante, pero para realizarlos será necesario poseer un mayor número de datos. Por este motivo ahora se analizará la geometría de lo detectado y su posición en la imagen.

Para poder realizar los cálculos geométricos y posicionales de los objetos con la exactitud que se requiere la imagen binaria de la que se dispone en este momento no es válida. Se necesita que los objetos de la imagen estén definidos por sus bordes.

En el área de procesamiento de imágenes la detección de los bordes de una imagen es vital, ya que es un paso necesario para muchos cálculos que definirán la imagen como los de áreas y posiciones.

Se han desarrollado variedad de algoritmos que ayudan a solucionar este inconveniente. Después de ser probadas distintas técnicas de detección de bordes, el algoritmo de Canny se eligió como la mejor opción y será el usado para detectar todos los bordes existentes en la imagen, ver Figura 3.17.

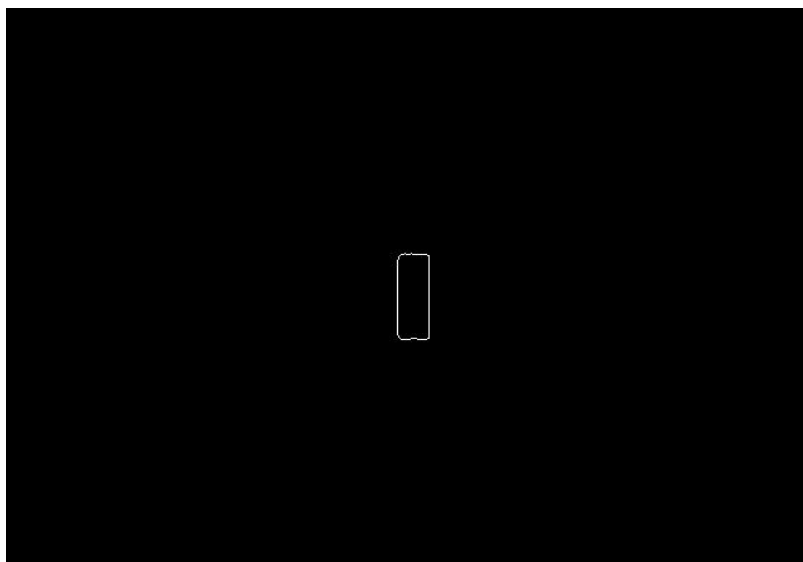


Figura 3.17: Resultado de aplicar el algoritmo de Canny a una de las franjas de la baliza ya umbralizada

El algoritmo de Canny hace uso del cálculo de la primera derivada en la imagen, este cálculo es de gran utilidad debido a que toma valor cero en las regiones en las que no varía la intensidad y adquiere un valor constante en toda la transición de intensidad. Por tanto, un cambio de intensidad se manifiesta como un cambio brusco en la primera derivada [15], característica que es usada para detectar un borde y en la que se basa el algoritmo de Canny.

Después de este primer procesamiento de la imagen se ha conseguido segmentarla con los parámetros de interés para la detección de la baliza. El siguiente paso sería confirmar que la baliza está en la imagen y si es así situar al robot respecto al objeto detectado, calculando ángulos y distancias para que se acerque a la estación de carga. Si por el contrario, la comprobación indicara que la baliza no está en la imagen Maggie continuaría girando sobre sí misma capturando y analizando otra región del entorno.

3.5.3 Confirmación de baliza y acercamiento

Obtenida la captura de una zona del entorno de Maggie definida por sus bordes, todavía no se sabe si la baliza está en ella o no. A pesar de ello, para la realización de los cálculos que vienen a continuación se supondrá que en la imagen está la baliza separada del entorno. Una vez realizados todos los cálculos se comprobará si son coherentes con la forma y posición de la baliza y así ver si la suposición anterior era cierta o no.

Debido a la existencia de posibles objetos con colores iguales a los de la baliza, a los cambios de iluminación y más sucesos que puedan perturbar la captura de la web-cam. Este primer algoritmo de procesado suele dar un resultado con ruido adyacente, ver Figura 3.18. El ruido puede provocar que las comprobaciones sobre la presencia de la baliza en la imagen sean poco fiables. Además, este ruido también afectará a los cálculos de situación del robot con la baliza y en consecuencia provocará un mal acercamiento a la estación de carga. Debido a este inconveniente se desarrollo la solución de introducir mascarar.

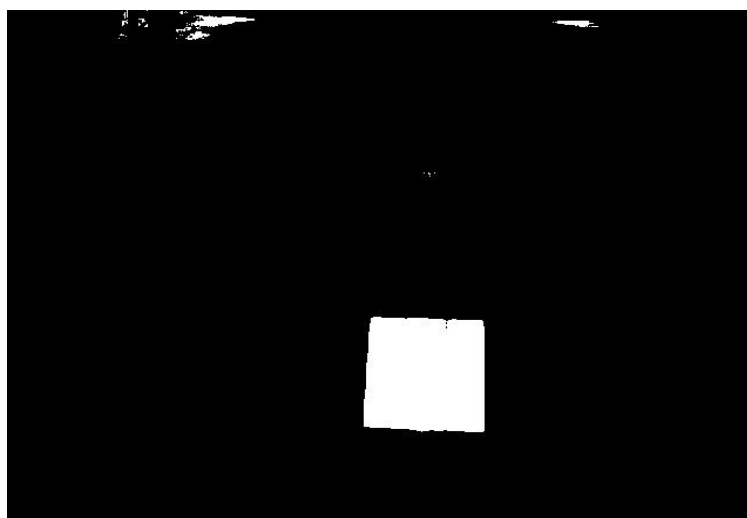


Figura 3.18: Ejemplo de una detección con ruido adyacente

Las mascarar, ver Figura 3.19, son imágenes binarias formadas por dos franjas negras situadas arriba y abajo de la imagen colocadas sobre un fondo blanco. El resultado que se obtiene al sumarlas (función OR) con la imagen es de eliminación total de todo el ruido que se encuentre donde las franjas negras.



Figura 3.19: Una de las mascarar que están en la base de datos a la espera de ser introducidas

Las mascarar eliminan todo lo que se encuentra en la misma zona de la imagen que las franjas negras, sea ruido o no, esto podría provocar la eliminación de parte del área de la baliza si ésta estuviera en esa zona. Debido a esto y a lo cambiante del tamaño de la baliza en la imagen con la distancia, las mascarar se introducirán en función de un valor aproximado de distancia a la baliza, sirviéndonos para ello de varios cálculos realizados a partir de esta primera imagen con ruido.

Como ya se ha comentado, para la introducción de la máscara correcta se utilizara la distancia, éste es un parámetro de gran importancia no solo para lo ya comentado sino en todo el proceso de acercamiento a la estación de carga. La obtención de la distancia no es trivial y previamente a su cálculo se requiere del conocimiento de otros parámetros. En los siguientes párrafos se describirán los pasos que realiza el proceso hasta calcular la distancia.

Primero a partir de la imagen definida por sus bordes se calcula el momento espacial. El momento espacial es un valor que determina la forma de los objetos en la imagen. A través del momento espacial se obtendrá el área. Todos estos cálculos se realizarán mediante funciones que proporciona OpenCv.

Usando los cálculos anteriores de momento espacial y área calcularemos el centro de gravedad (cdg) del objeto en x e y. Para hallarlos se divide el momento espacial de cada uno de sus respectivos ejes entre el área. Los cdg se utilizan para calcular la distancia pero serán un parámetro de gran utilidad a la hora de determinar si la baliza se encuentra en la imagen.

Con el objetivo de conocer la distancia a la baliza, después de hallar los cdg y utilizando la imagen binarizada (blanco=1; negro=0), obtenemos la fila y la columna de la imagen (píxeles) en la que están los cdg anteriormente calculados. Después, se cuentan el

número de píxeles igual a uno en la fila y columna de los cdg. Con esta cuenta se obtiene el valor en píxeles del ancho y el alto del objeto que se encuentre sobre el centro de gravedad.

Ahora ya se poseen todos los datos necesarios para poder calcular la distancia. El cálculo de la distancia se realizará teniendo en cuenta los anteriores cálculos, la distancia focal de la cámara y el tamaño de la baliza mediante la ecuación (3.1).

$$distancia\ objeto(píxeles) = \frac{distancia\ focal}{tamaño\ objeto * píxeles\ objeto} \quad (3.1)$$

Esta relación dará como resultado un valor que está relacionado con el alto en píxeles de la imagen binarizada. Éste no es un valor real de distancia, es necesario pasar el valor a unidades de distancia, para ello se midió empíricamente el valor que se obtendría con la relación anterior a 1000[mm]. Esta medida empírica se enlazó con lo anteriormente calculado tal y como se muestra en la ecuación (3.2).

$$distancia\ objeto[mm] = \frac{distancia\ objeto(píxeles) \times 1000mm}{distancia\ objeto(píxeles\ a\ 1000[mm])} \quad (3.2)$$

Conocido el valor de la distancia debe tenerse en cuenta que ha sido realizado a partir de la imagen con ruido, por lo tanto, se podrá ser más preciso. Para eliminar este ruido se introducirá la máscara mediante suma de las dos imágenes binarizadas. Se dispone de tres tipos de máscaras diferenciadas en que la franjas negras serán más o menos anchas. Se usará una u otra en función de si Maggie está a más de dos metros de distancia, entre uno y dos metros o a menos de un metro.

Una vez pasada por el filtro de la máscara la imagen de la que se dispone en este momento es bastante fiable, por lo que se vuelven a realizar todos los procesos anteriormente descritos para definir los parámetros de la imagen. Se vuelve a hacer la detección de los bordes y a través de esta imagen con los bordes se vuelven a estimar los centros de gravedad y la distancia, además de todos los parámetros definitorios ya comentados.

Todos los cálculos anteriores y los resultados obtenidos son de una detección en la que aparece una posible baliza obtenida de una imagen sin ruido. El siguiente paso a realizar será el de ver si los cálculos realizados acorde con esta imagen son coherentes con la baliza que estamos buscando.

Lo primero que se hace es comprobar si la máscara introducida es la idónea. Para que la máscara sea buena, no debe eliminar ninguna información del objeto que se quiere analizar. Para comprobar ese hecho, vemos si la distancia obtenida post-máscara no es cero.

Después, en función de la distancia a la que se encuentra Maggie se fija un error para las siguientes comprobaciones. Para fijar este error se tendrá en cuenta que a mayor distancia los píxeles abarcan más área.

Las comprobaciones de coherencia de datos se realizarán utilizando los centros de gravedad. Se analizará cada franja de color y también la imagen completa con la suma de la umbralización de los tres colores.

De la baliza se conoce tanto su forma como su posición, por ello, para reconocer a la baliza el proceso comprueba que las tres franjas de color estén juntas y en la posición que les corresponde. Primero, para ver si cada color encontrado pertenece realmente al de la baliza sabemos que la posición del centro de gravedad en x mas el ancho de una franja, debería ser aproximadamente el siguiente centro de gravedad en x . También se sabe que la baliza no está torcida respecto a la cabeza de Maggie, por lo tanto, los centros de gravedad en y deben ser muy parecidos.

Si estas pruebas confirman que la captura realizada se trata de la baliza se procederá a ver a qué lado de la estación se encuentra Maggie o en su defecto esta de frente a ella. Para esto se utilizarán las áreas de las franjas naranja y amarilla situadas en los extremos de la baliza sabiéndose que dependiendo de si Maggie se encuentra a un lado o a otro, la franja más cercana, es decir la que este en ese extremo, se verá en la imagen con un área mayor.

Si durante la ejecución de alguno de los anteriores procesos, se produjera algún resultado que indicara que la imagen capturada no se corresponde con el lugar de la habitación en el que se encuentra la baliza, la habilidad volvería al inicio. Los resultados que indicarán que la baliza no está en la imagen son: que el cálculo de la altura de la baliza diera valor cero, que el centro de gravedad estuviera fuera del rango de los 2^{16} bits de la imagen, o que las comprobaciones de coherencia de datos que se hacen utilizando los centros de gravedad resultaran no positivas.

Mientras todos los pasos anteriores se ejecutaban, Maggie siguió girando sobre sí misma en sentido horario. Este hecho supone que si no se encuentra la baliza se obtiene otra imagen pero de otra zona contigua del entorno. La forma de indicar al proceso que no se ha localizado la baliza se hace utilizando el parámetro de la distancia, teniendo en este caso el valor de cero.

En el caso que en la zona que se está analizando por visión se encuentre la baliza. Se supone que en ese lugar también se encuentra la estación de carga, por lo que se procederá al acercamiento.

A pesar de todos los intentos por refinar la segmentación del entorno la imagen obtenida nunca será totalmente fiel a la realidad. Este hecho provoca que los cálculos a razón de esta imagen tengan un cierto error, no siendo 100% fiables para que Maggie vaya a cargarse utilizando exclusivamente este análisis. Por ello se recurrirá a la visión solamente para una primera aproximación hasta más o menos metro y medio de distancia.

3.5.3.1 Etapa de acercamiento

Para iniciar el acercamiento se debe haber localizado la baliza en la imagen, por lo tanto, el proceso de análisis de la imagen dará como resultado una distancia distinta de cero, este valor puede ser mayor o menor de 1500 mm.

Si la distancia calculada fuera menor o igual a 1500mm Maggie se pararía pasándose a la siguiente parte del proceso. Esta parte se explicara con detalle en el capítulo 3.5.4 del presente proyecto.

Si por el contrario el valor de distancia fuera mayor de 1500 mm, el proceso iniciaría el acercamiento de Maggie a la baliza. Se pensó que el camino seguido debía ser lo más recto posible. La solución implementada con los medios que estaban al alcance en este punto del proceso (visión y sus respectivos cálculos), fue la de mantener en la imagen la baliza lo más centrada posible. Para este proceso de acercamiento se usa un algoritmo de tracking en el que se intenta mantener el centro de gravedad de la captura en x lo más centrado posible en la imagen. Se sabe que la posición central de la imagen está en el umbral entre 335 y 355, en base a esto se introduce una velocidad lineal y cuando el valor del centro de gravedad se salga del umbral marcado se introducirá una velocidad angular de corrección para que Maggie centre a la baliza en la imagen. Evidentemente esto se puede hacer debido a que el proceso se sigue ejecutando aunque Maggie se esté moviendo, refrescando continuamente tanto los valores de centro de gravedad como el de distancia. En el momento que Maggie esté a metro y medio se parará, comenzando aquí el siguiente punto del proceso de la auto-carga, la detección de la estación de carga a través del láser.

Todo el proceso de encontrar la baliza anteriormente descrito será utilizado en posteriores ocasiones, para comprobar que Maggie sigue enfrente de la baliza. Corroborando así que otros cálculos anteriores a la comprobación y sus correspondientes movimientos asociados se han realizado correctamente.

3.5.4 Detección y acople a la estación mediante cálculos con el láser.

Con el fin de situar al lector en el punto en el que se encuentra el proceso se describirán resumidamente los pasos seguidos hasta ahora. Para activar la habilidad, ésta recibe un evento, este evento indica que el nivel de las baterías ha llegado a un nivel crítico y es necesario que Maggie se cargue. Cuando esto ocurre, Maggie comienza a girar sobre sí misma a la vez que toma imágenes con cámara web del entorno. Mediante el análisis de estas imágenes se intenta encontrar la baliza de tres colores que se sitúa en el mismo lugar que el cargador. Este proceso se realiza mediante segmentación de la imagen y posterior búsqueda de evidencias de la baliza. Cuando la baliza es encontrada se indica al proceso lo alejada que esta Maggie pasándole una distancia distinta de cero. Encontrada la baliza, se

inicia un acercamiento en línea recta hasta una posición a metro y medio de la baliza y por lo tanto de la estación de carga, comenzando en este momento lo descrito a continuación.

Una vez a 1.5 m aproximadamente, se vuelve a comprobar que en el movimiento de acercamiento no hemos perdido la baliza de vista. Para la comprobación se calcula de nuevo la distancia a ésta. Cuando es obtenido el dato de distancia se comprueba que ésta es distinta de cero y por lo tanto la baliza está en la imagen. Si el resultado es positivo seguidamente se procederá a detectar la estación de carga con el láser.

El telemetro láser que proporciona Maggie permite al proceso tener acceso a valores muy precisos de distancia. Proporciona datos cada 0.5 grados, en un barrido de 180 grados, situado en la parte frontal de Maggie, consiguiéndose así 360 datos de distancia con ángulos conocidos.

A partir de las medidas del láser se buscan valores que se correspondan con la estación de carga pegada a la pared, ver Figura 3.20. Los parámetros a partir de los cuales se define la estación son la profundidad de ésta, la longitud de su frente y la certeza de que la estación no se encuentra a una distancia mayor de aproximadamente 1,5 metros.

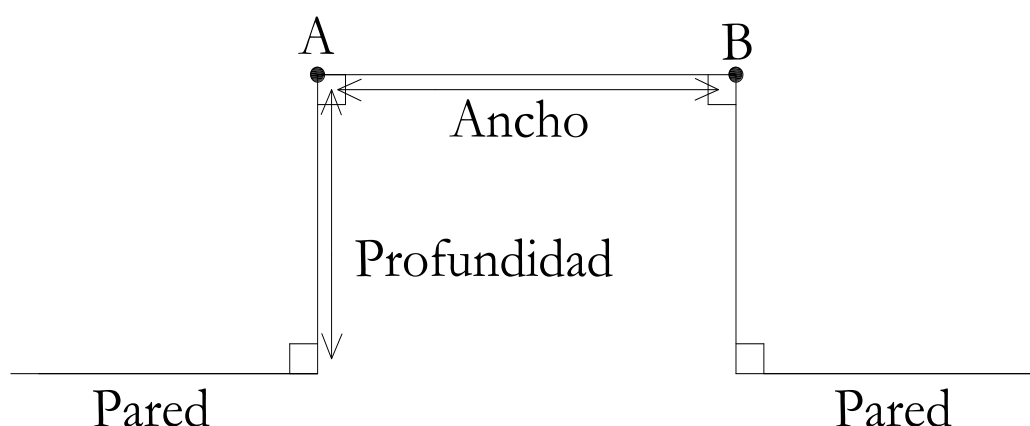


Figura 3.20: Forma asignada a la estación por los algoritmos del láser

A parte de todos los parámetros anteriores para encontrar a la estación, se utilizará un filtro adicional. Debido a que la aproximación a la estación mediante visión se ha realizado manteniendo la baliza en el centro de la imagen, se sabe que en el momento de comenzar el análisis con láser, Maggie se sitúa mirando de frente a la estación. Por este motivo, el barrido del láser no se analiza en todo su recorrido y solo se consideran medidas como posibles de la estación las que se encuentran entre 45° y 135°. Este filtrado de los datos del

láser se une al ya comentado de la distancia respecto a la estación, el límite de distancia al robot para que una medida se tenga en cuenta es de 2 metros. Una vez pasados estos filtros, los datos del barrido se analizan para encontrar los que coincidan con los parámetros de la estación de carga.

En primer lugar, se utiliza la profundidad de la estación con el objetivo de encontrar las esquinas del frente, ver Figura 3.20 córner A y B. Se ha considerado una esquina como un salto en la medida de longitud del láser. Este salto se mide restando un valor de distancia del láser con su anterior, comparándose después la diferencia con la profundidad de la estación. Para la comparación no se utiliza el valor exacto de profundidad de la estación, se introduce un margen de error ya que si el robot está haciendo el barrido desde uno de los lados de la estación, la longitud en línea recta a la pared será mayor.

Tras el análisis anterior, el proceso debería haber encontrado dos esquinas que podrían pertenecer a la estación. A partir de las dos esquinas obtenidas se analizará si la distancia entre ellas se corresponde a la longitud del frente de la estación, ver Figura 3.21. Para ello se utiliza el teorema del coseno tal y como se muestra en la ecuación (3.3).

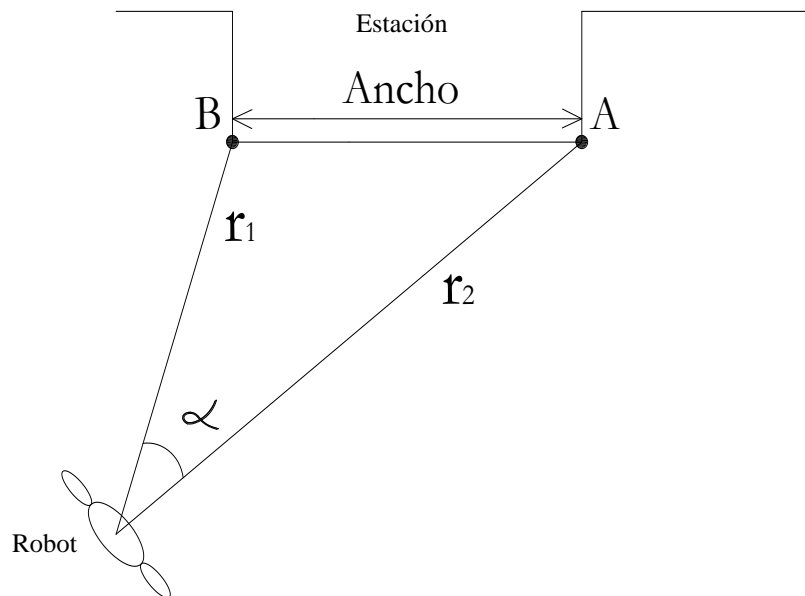


Figura 3.21: Análisis del coherencia de las esquinas A y B con el ancho de la estación

$$Ancho^2 = r_1^2 + r_2^2 + 2 * r_1 * r_2 * \cos(\alpha) \quad (3.3)$$

Siendo:

Ancho: Longitud el frente de la estación

r_1 : Distancia Maggie-córner A, (dato del láser)

r_2 : Distancia Maggie-córner B, (dato del láser)

α : Desfase entre la medida del córner A y B

Una vez realizado este cálculo, se comprueba si los datos son coherentes con la estación. Si no lo fueran se regresaría al análisis por visión realizándose de nuevo el proceso. Si por el contrario, fuera todo correctamente se analiza si el robot está a la izquierda, la derecha o centrados con la estación, mediante la resta de r_1 menos r_2 . Para ello, empíricamente se han colocado unos umbrales en los que la resta indicará la posición de Maggie respecto la baliza.

En este punto del proceso, se ha concluido con la detección de la estación mediante láser. Se ha obtenido como resultado las coordenadas x e y respecto a la posición en la que se encuentra el láser (desde la posición de Maggie) de los puntos A(x , y), B(x , y). Siendo estos puntos los que se corresponden a la forma de la Figura 3.20.

Ahora el proceso sabe donde se encuentra la estación de carga a través de las coordenadas de sus esquinas. Estas coordenadas serán utilizadas para llevar a Maggie hasta una posición en la que se pueda realizar el acople con la estación de manera segura. Para dirigirse hasta esta posición se usaran los córners A(x , y) y B(x , y) en busca de una distancia paralela a la línea creada por la unión pared-estación. Esta distancia indicará al proceso el recorrido paralelo a la pared que Maggie debe realizar hasta el centro de la estación de carga. También se usaran A(x , y) y B(x , y) para hallar un ángulo, el que después de recorrer la distancia y pararse, Maggie utilizará para girar ese valor de ángulo en grados y terminar mirando de frente a la estación. Cuando Maggie finalice este giro deberá estar mirando de frente a la estación desde la posición central de ésta, ver Figura 3.22.

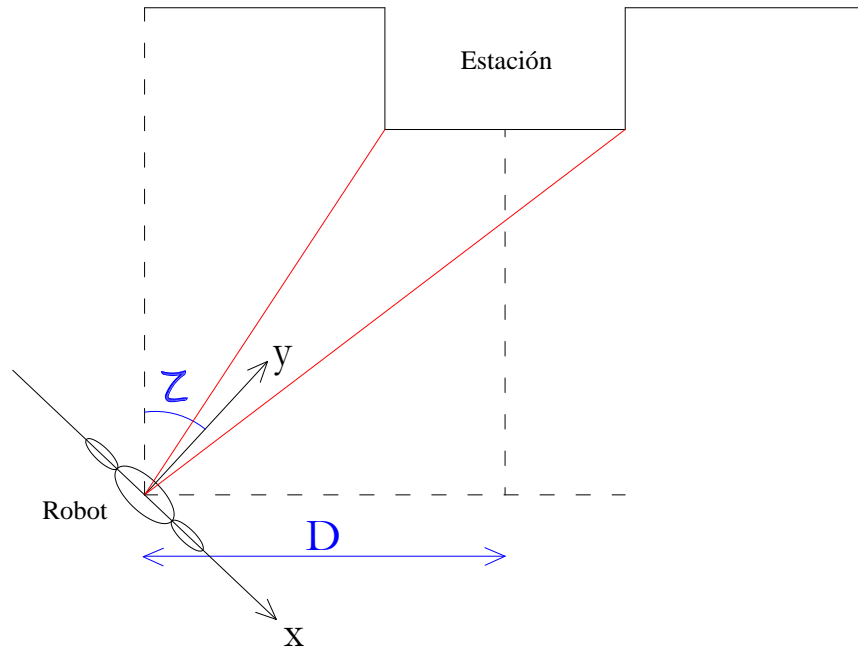


Figura 3.22: Datos necesarios para el acople

Para conseguir los valores τ y D , ver Figura 3.22, se deben realizar una serie de cálculos trigonométricos partiendo de los valores de r_1 , r_2 , θ_{r1} y θ_{r2} , ver Figura 3.23. Estos valores serán calculados a partir de las coordenadas de los córner de la estación A (x , y) y B (x , y), tal y como se indica en las ecuaciones (3.4) y (3.5). Para el cálculo de r_2 y θ_{r2} para el córner B sería igual usando sus datos correspondientes.

(3.4)

$$r = \sqrt{(AxEstCorner)^2 + (AyEstCorner)^2}$$

(3.5)

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{AxEstCorner}{AyEstCorner}$$

Siendo:

- r_i : La distancia desde la posición del láser al corner A.
- θ_{ri} : Angulo entre el eje y de Maggie y r_i
- $A_i EstCorner$: La posición i del corner A respecto a la posición del láser.

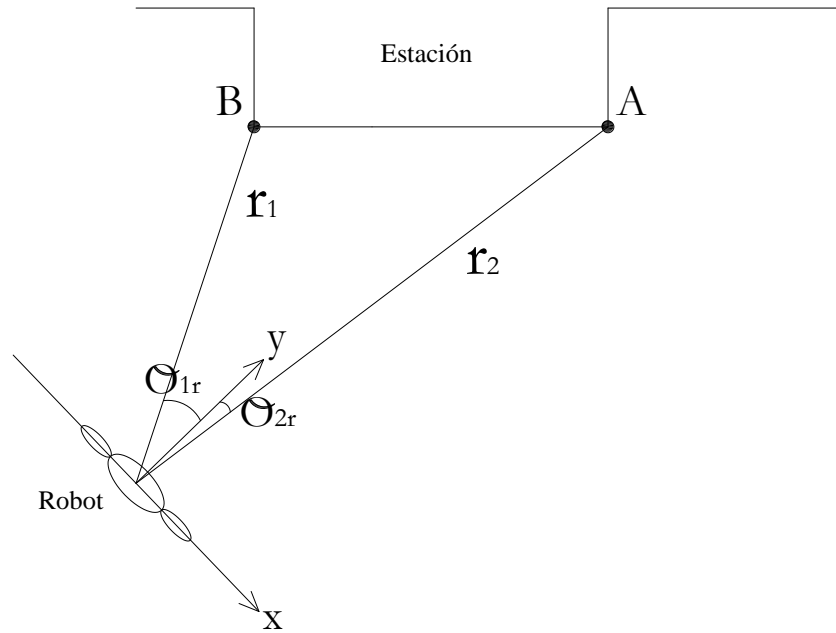


Figura 3.23: Datos obtenidos del algoritmo del láser

Una condición del algoritmo de cálculo trigonométrico de τ y D , es que r_1 siempre tiene que ser el valor que defina la distancia al córner que está más cerca de Maggie. Debido a que los córners A y B se colocan inicialmente según la dirección del barrido láser, es decir, derecha A (r_1) e izquierda B (r_2), la condición no siempre se cumplirá. En consecuencia, se deberá verificar la condición r_1 menor que r_2 para cumplir este requisito del proceso, teniéndose que cambiar los datos con los que se calculó r_1 , θ_{1r} , por los de r_2 , θ_{2r} y viceversa en el caso de que la condición no fuera correcta.

El siguiente dato de utilidad para el algoritmo serán los ángulos llamados θ_1 y θ_2 ver Figura 3.24. Sus valores definirán el ángulo existente entre r_1 y r_2 , con una prolongación imaginaria del eje x de Maggie, ver Figura 3.24. Se debe tener en cuenta que el dato de θ_r será positivo o negativo, dependiendo de si r_1 o r_2 está a un lado u otro del eje y de Maggie.

Para solventar este hecho, se utilizara la condición expresada en las ecuaciones (3.6) y (3.7). Consiguiéndose así que θ_1 y θ_2 siempre tengan el valor que deben.

$$\text{Si Maggie izq. de baliza} \begin{cases} \theta_1 = \frac{\pi}{2} + \theta_{1r} \\ \theta_2 = \frac{\pi}{2} + \theta_{2r} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\text{Si Maggie der. de baliza} \begin{cases} \theta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_{1r} \\ \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_{2r} \end{cases} \quad (3.7)$$

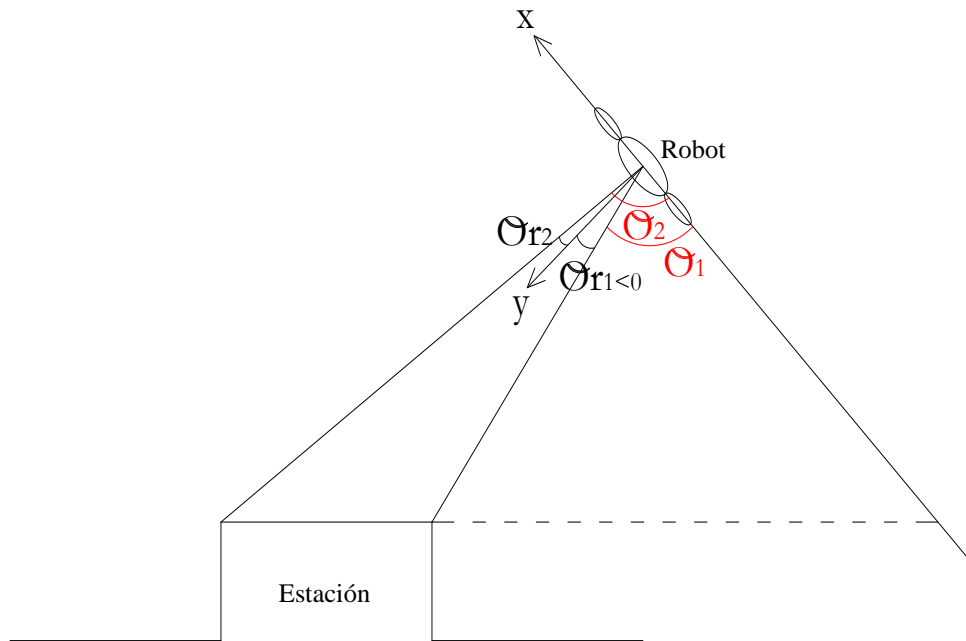


Figura 3.24: Muestra del cálculo

En este punto del proceso, se conocen r_1 , r_2 , θ_1 y θ_2 , teniéndose ya todos los datos necesarios para poder calcular D y τ . Su cálculo se realizará a partir de las relaciones trigonométricas que se describen a continuación.

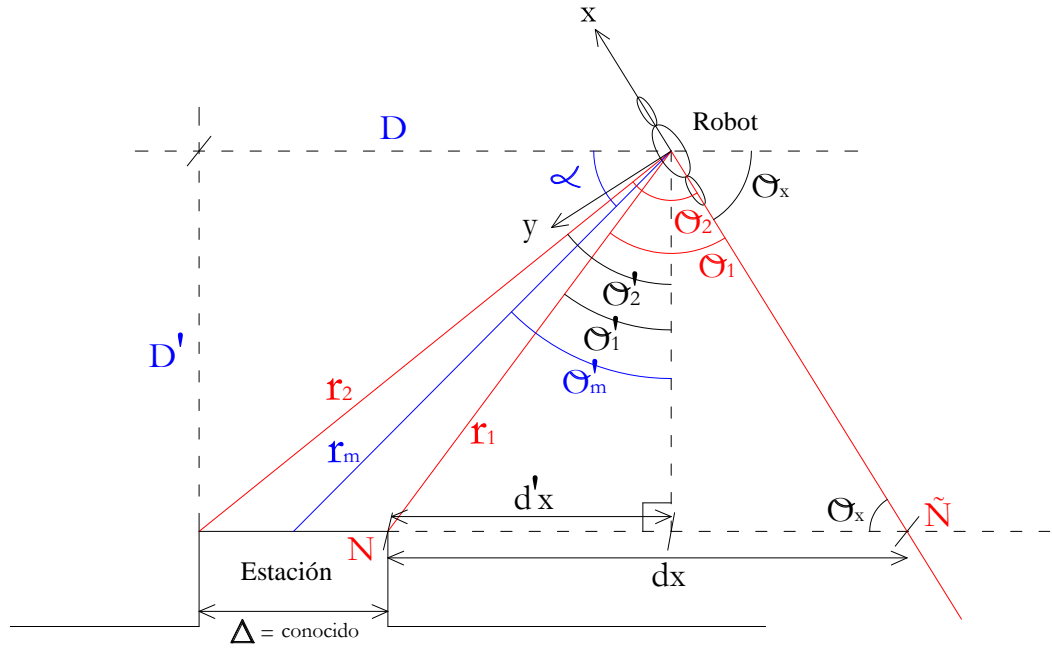


Figura 3.25: Datos conocidos y buscados

En primer lugar se calculará θ_x aplicando el teorema del seno en el triángulo formado por los puntos M, N, Ñ. Ver Figura 3.25 y ecuación (3.8).

(3.8)

$$\text{Teorema del seno} \rightarrow \frac{\sin \theta_x}{r_1} = \frac{\sin \theta_1}{dx} \rightarrow \sin \theta_x = \frac{r_1 * \sin \theta_1}{dx}$$

A partir del valor de θ_x se podrán calcular los valores θ'_1 , θ'_2 , θ'_m y d'_x , ver ecuaciones (3.9)-(3.13). Estos datos son los ángulos y distancia referenciados a la línea que va desde la posición de Maggie hasta la pared formando un ángulo recto con ella, ver Figuras 3.25 y 3.26. Para facilitar la comprensión de las nomenclaturas, a partir de ahora todos los valores que posean la tilde es que están referenciados a esta línea perpendicular a la pared.

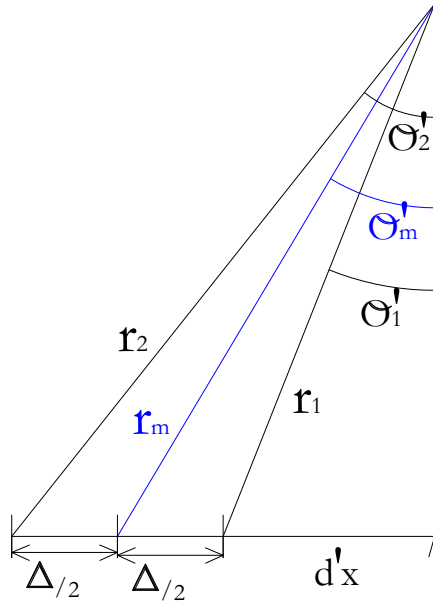


Figura 3.26: Vista del punto en el proceso de calculo

(3.98)

$$\theta'_1 = \theta_1 - \left(\frac{\pi}{2} - \theta_x\right)$$

(3.10)

$$\theta'_2 = \theta_2 - \left(\frac{\pi}{2} - \theta_x\right)$$

A partir de la definición del seno de θ'_1 y θ'_m :

(3.11)

$$d'_x = r_1 * \sin \theta'_1$$

(3.12)

$$r_m = \frac{d'_x + \Delta/2}{\sin \theta'_m}$$

Analizando la Figura 3.25: (3.13)

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta'_m$$

En este punto ya tenemos todos los datos necesarios para el obtener τ y D , que se obtienen tal y como se expone a continuación:

$$D = r_m * \cos \alpha \quad (3.14)$$

$$\text{Si izq: } \tau = \theta'_1 - \theta_{1r} \quad (3.15)$$

$$\text{Si der: } \tau = \theta'_1 + \theta_{1r}$$

Se realiza la distinción en los cálculos en función de la posición de Maggie debido a la orientación de los ejes x e y en la habilidad usada para este movimiento. La distinta orientación de los ejes produce cambios en el signo de los resultados obtenidos a través del láser, ver Figura 3.27.

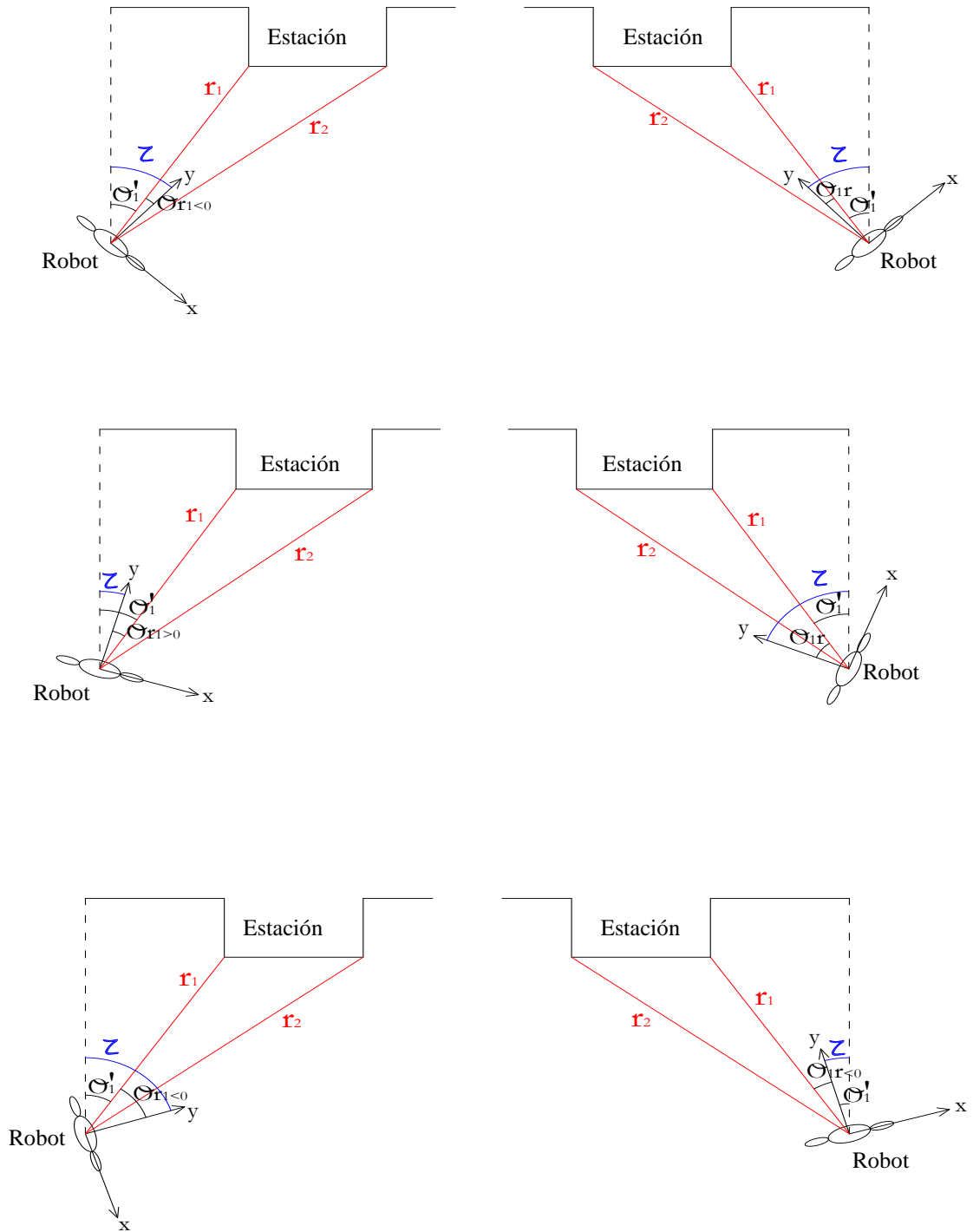


Figura 3.27: Cambios de los resultados en función de la posición de Maggie respecto a la estación

Una vez calculados los valores para centrar a Maggie con la baliza hay que usarlos para moverla hasta el lugar calculado. Este proceso se realizará utilizando una habilidad externa a la explicada en el presente proyecto. Esta habilidad hará que Maggie se mueva a un punto (x, y, θ) final partiendo de un punto (x, y, θ) actual, ver ecuaciones (3.14) y (3.15). En esta habilidad se toma como referencia el punto (x, y, θ) actual que se obtiene usando otra habilidad, la odometría de Maggie. La habilidad de odometría estima la posición actual como la posición relativa a la localización inicial desde la que comenzó a moverse Maggie.

Para el trasvase de los datos resultantes del algoritmo de ángulos anterior a la habilidad de movimientos relativos de Maggie, requiere de un cambio de ejes. Por una parte, los ejes que se toman para realizar los cálculos anteriores a partir de las medidas del láser, son inicialmente el eje x positivo a la derecha de robot, el eje y positivo el frente del robot y ángulos en sentido anti horario de 0 a 2π . Por otra parte, los ejes de la habilidad de movimientos relativos de Maggie son el eje x el frente del robot y el eje y hacia la izquierda de éste, además los ángulos son anti horarios, pero a diferencia de lo anterior van de 0 a π y de $-\pi$ a 0. El resultado de este trasvase de datos se expone en las ecuaciones (3.14) y (3.15).

(3.14)

$$\text{Si Maggie der. estacion} \begin{cases} pto.final_x = pto.actual_x + D * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_x + \text{desfase ejes}\right) / 100 \\ pto.final_y = pto.actual_y + D * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_x + \text{desfase ejes}\right) / 100 \\ pto.final_\theta = pto.actual_\theta - \tau \end{cases}$$

(3.15)

$$\text{Si Maggie izq. estacion} \begin{cases} pto.final_x = pto.actual_x + D * \cos(\text{desfase ejes} - \theta_x) / 100 \\ pto.final_y = pto.actual_y + D * \sin(\text{desfase ejes} - \theta_x) / 100 \\ pto.final_\theta = pto.actual_\theta + \tau \end{cases}$$

Siendo desfase ejes, ver Figura 3.28, el ángulo entre los ejes de Maggie respecto a su posición inicial. El valor de este desfase es el ángulo que proporciona la odometría, pero para simplificar el trasvase de datos se ha cambiado su rango $(0, \pi; -\pi, 0)$, al rango $(0; 2\pi)$.

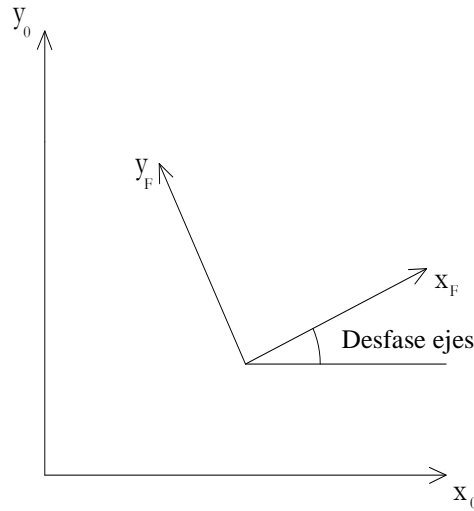


Figura 3.28: Ejemplo del cambio de ejes realizado. x_0, y_0 ejes donde se iniciaciliza Maggie; x_f, y_f ejes actuales de Maggie

En este punto del proceso, ya debería estar Maggie justo en frente de la estación de carga. Esta es una posición perfecta para iniciar un acople sin daños tanto para ella como para el cargador. Sin embargo, debido a los posibles errores cometidos en la medida o en el cálculo de la odometría, se introducirá en el proceso un nuevo análisis con el láser para dotar al proceso la mayor robustez posible. Este nuevo análisis con el láser consiste en que una vez realizados los movimientos que indican los cálculos anteriores, se vuelve a buscar la estación con el barrido láser. Una vez encontrada la estación, se calcula el punto medio de ésta a través de los datos del láser, ya que se conoce el dato correspondiente al inicio de la estación y el del final. A través de estos puntos inicial y final de los que se conoce su distancia a Maggie, su ángulo respecto al inicio del barrido y el número de dato que es, se calcula el punto medio entre las dos medidas; siendo este:

(3.16)

$$\text{dato medio de la estación} = (\text{dato final} - \text{dato inicial}) + \text{dato inicial}$$

Una vez se conoce cuál es el punto medio de la estación, solo queda girar a Maggie el ángulo necesario para que mire de frente a la estación. Para realizar este giro, al ángulo de la posición media se le resta 90° si se quiere girar a la derecha y se le resta el ángulo del punto medio a 90° si se quiere girar a la izquierda. Esto es así porque este giro se realiza con las funciones de movimiento relativo de Maggie sin odometría, a las cuales, únicamente es necesario indicarle el ángulo de giro y si es a la izquierda o la derecha.

Ahora Maggie está situada en el punto medio de la estación y mirándola de frente, posición adecuada para realizar el acople. Para comprobar que la maniobra de llegar hasta este punto se ha realizado correctamente se vuelven a realizar los procesos de visión anteriormente explicados, es decir, se busca la baliza y se calcula la distancia hasta la posición en la que supuestamente se debería encontrar Maggie en este momento. Realizados estos cálculos se comprueba si los valores obtenidos son coherentes. Si tras estas comprobaciones no se encuentra la baliza delante de Maggie se procede al inicio de la habilidad, si por el contrario, sí que está la baliza significara que todo ha ido bien procediéndose al acople.

Para el acople es necesario que Maggie gire 180^0 , debido a que la herramienta de enchufe de Maggie con las barras de carga de la estación están en su parte posterior, ver Figura 3.5. Una vez haya girado, Maggie solo tendría que ir hacia atrás para conectarse. El momento para parar este retroceso es cuando la tarjeta de adquisición de datos LABJACK (sensor que mide el voltaje de las baterías, ver sección 3.3) obtenga el valor asociado a que Maggie está cargándose. Este hecho hará que se bloquee la habilidad mediante un evento. Si el robot tardara en recibir la información de cargándose más de un tiempo establecido como máximo para llegar a la estación, se pararía iniciando de nuevo todo el proceso.

Llegado este punto el proceso de auto-carga ha finalizado, en el siguiente capítulo se expondrán los resultados obtenidos durante la ejecución de la habilidad.

Capítulo 4:
RESULTADOS
OBTENIDOS Y
LIMITACIONES
DEL SISTEMA

4 RESULTADOS OBTENIDOS Y LIMITACIONES DEL SISTEMA

4.1 Resultados experimentales

En este capítulo se mostrarán los resultados de las diferentes pruebas de la habilidad de auto-carga realizadas con el robot Maggie. Estas pruebas han servido para comprobar si los cálculos que se realizaron teóricamente son realmente extrapolables a la realidad, además estas pruebas empíricas han sido utilizadas para fijar algunas de las constantes del proceso como velocidades, posiciones iniciales, umbrales, etc. A continuación se mostrarán los resultados mencionados.

En primer lugar, la implementación de la habilidad ha mostrado que el umbral de carga mínima 20V, ha resultado efectivo. Con esto se quiere decir que el umbral inferior de 20V permite al robot, una vez la carga está debajo de este umbral, iniciar la habilidad de auto-carga, realizar todo el proceso de encontrar la estación y finalmente enchufarse sin que la batería se agote antes de realizar todo el proceso. Este umbral también ha permitido que el robot pudiera operar normalmente durante un tiempo razonable a la capacidad de las baterías que lleva a bordo, ya que tampoco sería de utilidad que la habilidad estuviera continuamente activándose, impidiendo la realización de las demás tareas que el robot tenga asignadas.

Para la colocación de la cabeza, tal como se explico en el capítulo 3, se buscó que su posición estuviera a una altura tal que al mirar Maggie a la baliza, la imagen de ésta quedara lo más centrada posible en el eje y de la imagen capturada. Además, la cabeza debe estar mirando de frente ya que es de vital importancia para los cálculos posteriores y el acercamiento por tracking. La cabeza se mueve a posiciones relativas a su posición inicial, siendo esta posición inicial la posición que tiene la cabeza cuando Maggie es encendida. Por todo lo anterior, es de gran importancia que al encenderse Maggie la cabeza esté en la posición marcada como inicial, de no ser así, no se puede asegurar que se realice el proceso de forma satisfactoria. Esta posición inicial se ha marcado mirando de frente y sin ninguna inclinación. Todo esto no solo es necesario por lo ya comentado, sino también por seguridad, ya que el cuello de Maggie tiene unos finales de carrera y no posee ningún sensor para reconocerlos. Los motores del cuello se mueven hasta la posición marcada sin detenerse, aunque haya un obstáculo, por lo que, si la posición inicial no es la supuesta se podrían rebasar los finales de carrera. Este hecho provocaría daños tanto para los motores como para la estructura de Maggie. El valor de los puntos a los que tiene que moverse el cuello son 0 en el eje horizontal y 15 en el vertical.

Una de las partes fundamentales del análisis por visión del entorno es la umbralización de los colores pertenecientes a la baliza. Estos umbrales son constantes del proceso definidas en el fichero *.h. Los umbrales fueron obtenidos a partir de pruebas empíricas realizadas con la cámara web. Los valores aproximados entre los que se sitúa cada color en el código de colores HSV son conocidos y mediante el método de prueba y error se ajustaron estos rangos para adecuarlos a los colores concretos de la baliza capturados con la cámara que proporciona Maggie.

Los umbrales utilizados para el matiz o clase de cada color (H) se exponen a continuación:

Rosa: 143-124

Amarillo: 113-96

Naranja: 120-112

El umbral para la saturación (S), que indica que existe algún color, se impuso para todos los colores entre 190 y 225.

Estos umbrales están definidos para las condiciones de luminosidad del laboratorio. Si fuera necesario que la habilidad se ejecutara en otros lugares, con otras condiciones de luminosidad distintas, es probable que fuera necesario cambiar estos umbrales. Aunque las condiciones cambiaran mucho los umbrales se moverán en rangos muy cercanos a los que ya tienen, por lo que, mediante la misma metodología de prueba y error ya usada para obtenerlos se podrían cambiar estos valores fácilmente. Para comprobar si los nuevos umbrales utilizados son correctos la habilidad da la posibilidad de salvar las imágenes resultantes de la umbralización.

Durante todo el proceso de búsqueda de la baliza, Maggie gira sobre sí misma de manera continua. Mientras Maggie está girando, todo el proceso de captura y análisis de imágenes se está realizando una y otra vez hasta encontrar la baliza. En el momento que la baliza es encontrada, Maggie se parará y se acercará a la ella. Para asegurar la detección de la baliza a lo largo de como máximo una vuelta completa de Maggie sobre sí misma, la velocidad de giro en este procedimiento debía ser tal que permitiera realizar todo el proceso de captura y análisis antes que la baliza desapareciera de la imagen. Concretando lo anterior, era necesario una vez acabado el proceso si no se encontraba la baliza y al capturarse otra imagen del entorno, ésta nueva imagen fuera contigua a la tomada y analizada con anterioridad, sin que se hubiera dejado alguna zona sin analizar debido a que la velocidad de giro fuera demasiado rápida. La velocidad angular que se ha tomado para que se cumpla el requisito anteriormente explicado es de 10 (rad/seg).

Una vez encontrada la baliza, se lleva a cabo el acercamiento de Maggie a la estación de carga, para ello, se introdujo un algoritmo de tracking en el proceso. El algoritmo de tracking diseñado e implementado, analiza la posición de la baliza en la imagen e intenta mantener su centro de gravedad en el centro de la imagen. Para mantener el centro de gravedad de la baliza centrado se impuso un umbral del que dicho centro de gravedad no debería salirse. Este umbral utilizado fue el del rango de píxeles en el eje x 335 y 355. Después de haberse ejecutado el proceso en repetidas ocasiones se puede asegurar que Maggie se acerca de forma adecuada a la baliza, o lo que es lo mismo, a la estación.

En la ejecución del proceso, se pudo observar que durante el análisis del entorno mediante visión, en ocasiones, el proceso confunde objetos lejanos con colores como los de la baliza con la propia baliza. Esto no ha supuesto un problema, ya que durante el acercamiento a esta falsa captura al seguir analizando la captura para su acercamiento, el proceso por sí solo reconocía el error, volviendo a iniciar la búsqueda mediante el giro de Maggie sobre su eje.

El siguiente paso del proceso corresponde a la detección de la baliza usando el telémetro láser. Se ha comprobado que la baliza es detectada por el láser y realiza todo el cálculo correctamente. A la hora de realizar los movimientos que le indica todo el procedimiento anterior de cálculo, se ha comprobado que el robot no es 100% preciso. Este error producido en los movimientos se debe a errores acumulados de la odometría y de algún posible error en las medidas del láser. Este problema se ha solventado con el segundo análisis del láser y posterior centrado, unido al margen de error en el ángulo de entrada que permite el enchufe del cargador.

Se han realizado una serie de pruebas del proceso completo, para ello se ha dividido en cuatro las posibles zonas desde las que puede activarse la habilidad, ver Figura 4.1. Se ha ejecutado la habilidad desde estas cuatro zonas, obteniéndose 20 muestras desde cada una. Se ha comprobado en cuántas de las ejecuciones el proceso se realizaba correctamente y si no era correcta cuál fue el fallo. La habilidad se ha ejecutado veinte veces en cada zona y los resultados han sido los siguientes:

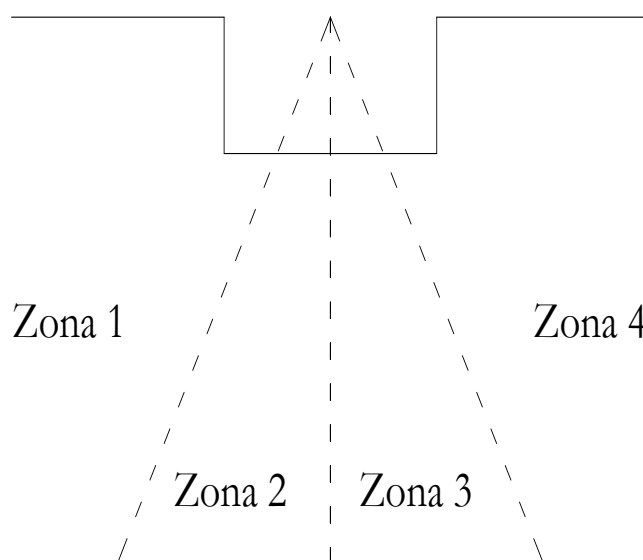


Figura 4.1: División en zonas de la habitación para la toma de muestras

- **Zona 1:** La zona 1 se corresponde a los casos en los que la habilidad se ejecuta estando el robot entre 0 y 45 grados respecto a la estación. De las 20 ejecuciones 16 se realizaron a la perfección y 4 de ellas fueron fallidas. Los procesos fallidos se produjeron en las ejecuciones 4, 10, 12 y 18. La muestra numero 4 falló, fue debido a un fallo en el proceso de análisis del lado respecto de la estación en el que está Maggie, calculó que Maggie se situaba centrada cuando en realidad se situaba a la izquierda. Este error del análisis de la posición hace que no se realice el acercamiento via láser (ya que: centrado= posición correcta), quedándose el robot mirando de frente a la estación pero demasiado a la izquierda, lo que podría llevar a un error en el acople. Este problema se resolvió “in-situ” cambiando el umbral que asigna la

posición de centrado haciéndolo más restrictivo, no volviéndose a dar este error en posteriores ejecuciones. La muestra numero 12 fue fallida debido a que Maggie a la hora de realizar el movimiento a partir de los cálculos del laser se acerco en exceso a la estación corriendo peligro de choque con ella por lo que se paró la ejecución. Es de remarcar que las muestras fallidas 10 y 18 realizaron bien todo el proceso de detección y acercamiento por visión, produciéndose el fallo a la hora del último centrado con el laser. El robot quedo en una posición correcta pero insuficientemente centrada con la estación como para realizar el acople correctamente.

- **Zona 2:** Es la zona donde la ejecución se produce en un espacio entre los 45 y 90 grados respecto a la estación. Los fallos se produjeron durante la ejecución de las muestras 6, 8, 11. El fallo durante la ejecución numero 6 se produjo debido a la confusión durante el proceso de visión, tomándose como baliza algo que no lo era. Este fallo se debió a que las pruebas 6 y 7 se estaban realizando con una luz más fuerte a la utilizada para el cálculo de los umbrales, lo que hace que el análisis por visión pierda robustez. La muestra 7 se realizó en las mismas condiciones que la 6 y fue exitosa. En la muestra 8 se produjo un error en el cálculo de la distancia, quedando Maggie al final de todo el proceso de acercamiento ligeramente alejada de la estación aunque bien colocada, el proceso fue correcto pero la distancia no es la adecuada para realizar un acople sin riesgos. En la muestra 11, el fallo se produjo debido a la introducción de un objeto con los colores de la baliza en el camino durante el algoritmo de acercamiento por tracking, esto hizo errar al proceso de fijación de la baliza en el centro de la imagen durante el acercamiento.
- **Zona 3:** Esta zona abarca todas las ejecuciones que se realizaron cuando Maggie, al inicio del proceso, se situaba en una posición entre los 90 y los 135 grados respecto a la estación. Las ejecuciones desde las ubicaciones correspondientes a esta zona no produjeron ningún error. Únicamente, comentar que en la muestra numero 8 el robot no quedó mirando completamente centrado a la estación pero la conexión era posible.
- **Zona 4:** La última zona de pruebas se corresponde a situaciones de inicio de la habilidad con Maggie situada entre 135 y 180 grados. Durante esta batería de pruebas se produjeron errores en las ejecuciones 3, 7, 15 y 19. Los errores 3 y 19 se produjeron debido a un problema con los cálculos del láser, los cuales, situaron a Maggie más descentrada de lo que cabía esperar, siendo posible el acople con la estación pero no resultando la mejor de las posiciones. Las muestras 7 y 15 fueron fallidas debido a que Maggie entraba muy ladeada y al acercarse a la estación utilizando los cálculos del láser, paso demasiado cerca de la estructura del cardador corriendo el peligro de chocar, por lo que, la habilidad debió ser parada.

En resumen, se ejecuto el proceso 80 veces de las cuales 11 fueron fallidas. De los 11 fallos, 3 fueron debidos a errores con la visión (1 error en el cálculo de distancia y 2 confusión en la detección de la baliza); 4 fueron por errores en la colocación después de los cálculos del láser; 1 fallo se debió a un mal umbral en el cálculo con la colocación respecto a la baliza (corregido); 3 fallos provocaron un acercamiento excesivo a la estación. Estos datos se representan en la siguiente tabla de manera resumida:

	Ejecución Correcta	Ejecución Fallida	Porcentaje de éxito
Zona 1	16	4	80%
Zona 2	17	3	85%
Zona 3	20	0	100%
Zona 4	16	4	80%
Total	69	11	86%

Tabla 1: Resultados de la batería de pruebas de la habilidad

4.2 Limitaciones del sistema

Los mayores problemas a la hora de encontrar una solución robusta, se han encontrado en el campo de visión por computador. Esto es debido a las variaciones que se producen en la captura en función de los cambios de iluminación. Estos cambios de iluminación provocan que los objetos y en concreto, la baliza de tres colores, al estar iluminados en mayor o menor medida serán capturados por la cámara con una intensidad en relación a dicha iluminación. Los cambios de iluminación provocarán que los umbrales para cada color cambien, reduciendo el área localizada y afectando a otros cálculos como la distancia o el lado respecto a la baliza. Además, existen otras iluminaciones de gran potencia incidente que producirán reflejos haciendo una detección nula, ver Figura 4.2. En el afán de conseguir una solución que fuera inmune a los cambio de iluminación se trato la imagen mediante los procedimientos ya explicados en el capítulo 3, como ecualizar el histograma o pasar la imagen a HSV. Por otro lado, se intentaron otras soluciones que finalmente fueron descartadas por la falta de resultados como por ejemplo el emborronamiento de la imagen, o el intento del uso de otro tipo de baliza con otra forma. Finalmente, se ha conseguido un sistema resistente a cambios de iluminación siempre que no sean de gran importancia.

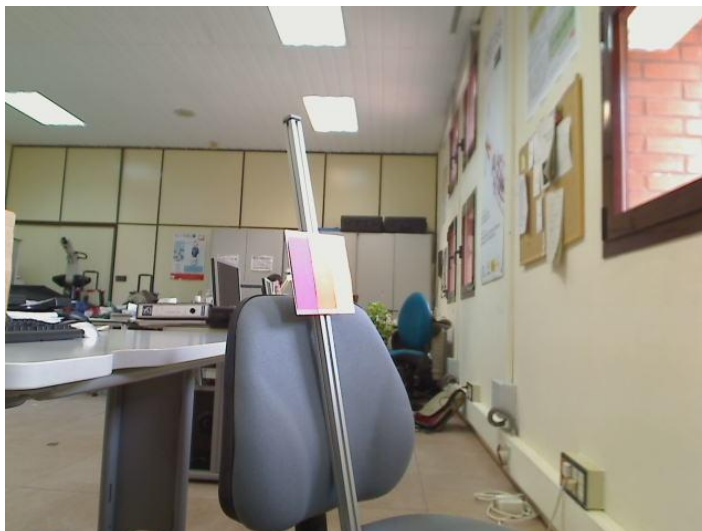


Figura 4.2: Gran incidencia de luz sobre la baliza

Un hándicap del sistema es a la hora de usar el láser para localizar la forma de la estación, siendo necesario que ésta se sitúe pegada a la pared, o a alguna superficie plana para ser localizada, ver Figura 3.8. La altura a la que se realiza el barrido del láser, unido a la suposición de que habrá una pared detrás de la estación para hallar la profundidad, hacen que la estación deba estar dando la espalda a alguna superficie plana de una altura mínima aproximada de 25 cm (altura del barrido láser).

Otra de las limitaciones de la habilidad es la incapacidad de poder detectar la estación si ésta se encuentra fuera de la habitación en la que está Maggie en el momento que se produce el evento de inicio de la habilidad. Esto es debido a que Maggie, si no encuentra la baliza, solamente girará sobre sí misma suponiendo que la baliza y en concreto la estación se encuentra a la vista.

En cuestiones de seguridad del procedimiento, el sistema no tiene la capacidad de detectar posibles obstáculos que se interpongan en el camino del robot durante el proceso. Otra limitación en cuestiones de seguridad es que el robot no da la posibilidad de analizar el entorno que se sitúa en la parte trasera del robot, ya que no proporciona ningún sensor para ello.

Capítulo 5:

CONCLUSIONES Y

TRABAJOS FUTUROS

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones del proyecto

Ahora llegado a este punto se reflexionará sobre si se han conseguido los objetivos marcados al inicio del proyecto y expuestos en la sección 1.1, para después ver las posibles mejoras de la solución diseñada.

Se ha conseguido implementar en una plataforma real, que es el robot Maggie, una habilidad dentro de la arquitectura AD que ha permitido a dicho robot ser energéticamente independiente. Maggie puede por sí misma recargar sus baterías en el momento que su sistema sensorial le indica que el estado de estas está por debajo de un umbral marcado.

Este objetivo general requería la obtención de otros objetivos secundarios. Se ha logrado segmentar el entorno de Maggie en los parámetros que interesaban para encontrar la estación de carga, para ello se han usado algunas de las herramientas que dicha plataforma facilitaba.

Para la segmentación del entorno en busca de la baliza de tres colores situada encima de la estación de carga, se ha hecho un primer análisis con visión por computador. Una vez encontrada dicha baliza y tras distintas comprobaciones para poder asegurar que no se estaba ante un falso positivo, se realizaron cálculos a partir de las dimensiones de la captura que proporcionaron datos de distancia al objetivo y ubicación respecto a él. Estos datos permiten el acercamiento en línea recta hasta aproximadamente un metro y medio del cargador mediante un algoritmo de tracking.

Una vez situada Maggie en una posición cercana a la estación y mirándola de frente, se consiguió realizar cálculos más precisos a través del telemetro láser que proporciona el robot. A partir de los datos del láser se obtiene una posición de la estación mucho más precisa, posibilitando el cálculo de las coordenadas exactas para situar al robot delante del cargador. Finalmente, situado el robot delante de la estación se realizó el acople sin que ni el robot ni la estación sufrieran daños.

Después de todo este proceso se puede decir que se ha conseguido dotar al robot personal Maggie de una independencia energética. Esta independencia hará que el robot cumpla un requisito indispensable para ser considerado como autónomo, y esta autonomía acercará más a Maggie a la normalización en su interacción con los humanos.

5.2 Trabajos futuros

El proceso desarrollado en este proyecto posee una gran robustez, habiéndose trabajado mucho en que la influencia de la luz en la segmentación del entorno por visión fuera lo menor posible y que el cálculo del barrido láser tuviera las mínimas restricciones. Aún así, estos problemas no se han conseguido solventar en su totalidad siendo la mejora de estos hándicaps un buen camino a seguir en futuras mejoras.

Debido a la posibilidad de la existencia de una estructura próxima a la estación de carga con unas dimensiones similares, siempre existe una posibilidad de una identificación errónea de la estación de carga. Dado que en Robotics Lab se está desarrollando un sistema de navegación basado en radiofrecuencia, se pretende aumentar la fiabilidad del sistema incluyendo la identificación inequívoca de la estación de carga mediante etiquetas RFID [1].

Se deberá trabajar en limitaciones de seguridad comentadas en el capítulo anterior, como son el análisis dinámico de posibles obstáculos que se encuentre el robot durante el proceso y la colocación de sensores que permitan al robot analizar su parte trasera.

También sería muy interesante mejorar otras de las restricciones de la solución. Como posibilitar que Maggie encontrará la estación de carga incluso situándose en otra habitación que no sea la que está en este momento.

Basándonos en [7] y [8] se pretende incluir la habilidad de auto-carga desarrollada como parte de un comportamiento emocional del robot. Así se podría determinar un estado de “cansado” en el que el robot tendrá como objetivos ahorrar energía y buscar una estación de carga lo antes posible [1].

Como conclusiones personales me gustaría comentar el gran reto que ha supuesto para mí la realización de este proyecto, debido a la gran cantidad de materias desconocidas para mí antes de su desarrollo y que he debido aprender para completarlo. Esto ha supuesto una gran satisfacción, a la vez de haber podido disfrutar de una gran oportunidad al haber trabajado con una plataforma como es el robot Maggie que es única en España y con la que no solo he aprendido las cosas que se ceñían a la realización de mi proyecto, sino muchas otras que seguro me serán de gran utilidad en el futuro.

Capítulo 6:

REFERENCIAS

6 REFERENCIAS

- Castro-González A., Cobos L. F., E. Delgado, Salichs M. A.. *Habilidad de carga de batería automática para un robot personal*. RoboticsLab Universidad Carlos III de Madrid. 2008.
- Roomba official site: <http://www.la-romba.com>.
- Honda Motor Co, Ltd. *Technical Information*. Public Relations Division. September 2007.
- Aibo user`s guide: http://support.sonyeurope.com/AIBO/downloads/en/Basic_EN.pdf.
- Oh Seungjun, Zelinsky Alexander, Taylor Ken. *Autonomous Battery Recharging for Indoor Mobile Robots*. Australian National University Department of Engineering Canberra, ACT 0200 Australia
- Análisis del estado del arte de sistemas sensoriales para reconocimiento del entorno. www.depeca.uah.es/personal/alfredo/phd/estado_del_arte.pdf.
- Güemes Güemes Beatriz. *Función sensorial de imagen omnidireccional e imagen 2D*. CSIC Instituto de Automática Industrial. 2007.
- De Podesta Michael. *Understanding the Properties of Matter*. 2002.
- Teletransporte de un rayo láser <http://www.elmundo.es/>. 23 de Junio de 2002.
- Salichs,M. A. et al. (Jun 2006) *Maggie: A robotic platform for human-robot social interaction*. In IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM 2006), Bangkok. Thailand.
- Oh Seungjun, Zelinsky Alexander, Taylor Ken. *Autonomous Battery Recharging for Indoor Mobile Robots*. Australian National University Department of Engineering Canberra, ACT 0200 Australia
- Drenner Andrew, Papanikolopoulos Nikolaos. *Autonomous Multi-Robot Docking*. Center for Distributed Robotics. Department of Computer Science and Engineering. University of Minnesota, Minneapolis, USA.
- Cobos, L.F. *Especificaciones técnicas del robot Maggie*. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática Universidad, Carlos III de Madrid. Junio de 2007
- Malfaz María, Salichs Miguel A. (2004), “*A New Architecture for Autonomous Robots Based on Emotions*”.

- Salichs, M. A. et al. (Jun 2006) *Maggie: A robotic platform for human-robot social interaction*. In IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM 2006), Bangkok. Thailand.
- Collado Juan Manuel, Hilario Cristina, Armingol José María, de la Escalera Arturo. *Visión por Computador para Vehículos Inteligentes*. Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid.
- Malfaz María (2007), “*Sistema de toma de decisiones basado en emociones y autoaprendizaje para agentes sociales autónomos*”, Tesis doctoral.
- Pallás Areny Ramón. "Understanding Data Converters Application Report", Texas Instruments. 1997.
- López-Orozco, J.A. *Integración y Fusión Multisensorial en Robots Móviles Autónomos*. Tesis Doctoral. Dpto. Arquitectura de Computadores y Automática. Físicas. Universidad Complutense, Madrid. 1999.
- Schneider. M. *Planificación basada en percepción activa para la navegación de un robot móvil*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense, Madrid. 1996.
- Pajares Gonzalo, de la Cruz Jesús M.. *Visión por Computador. Imágenes digitales y aplicaciones*. Ra-Ma. 2001.
- Malfaz M.; Salichs M.A. *Using Emotions for Behaviour-Selection Learning*. The 17th European Conference on Artificial Intelligence. ECAI 2006. Riva del Garda. Italy. Agosto de 2006.
- Gil P., Torres F., Ortiz. F.G. *Detección de objetos por segmentación multinivel combinada de espacios de color*. Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial. Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante. 2005.
- Página de la wikipedia: <http://es.wikipedia.org/>
- Página del software OpenCv: <http://www.OpenCv.com/>